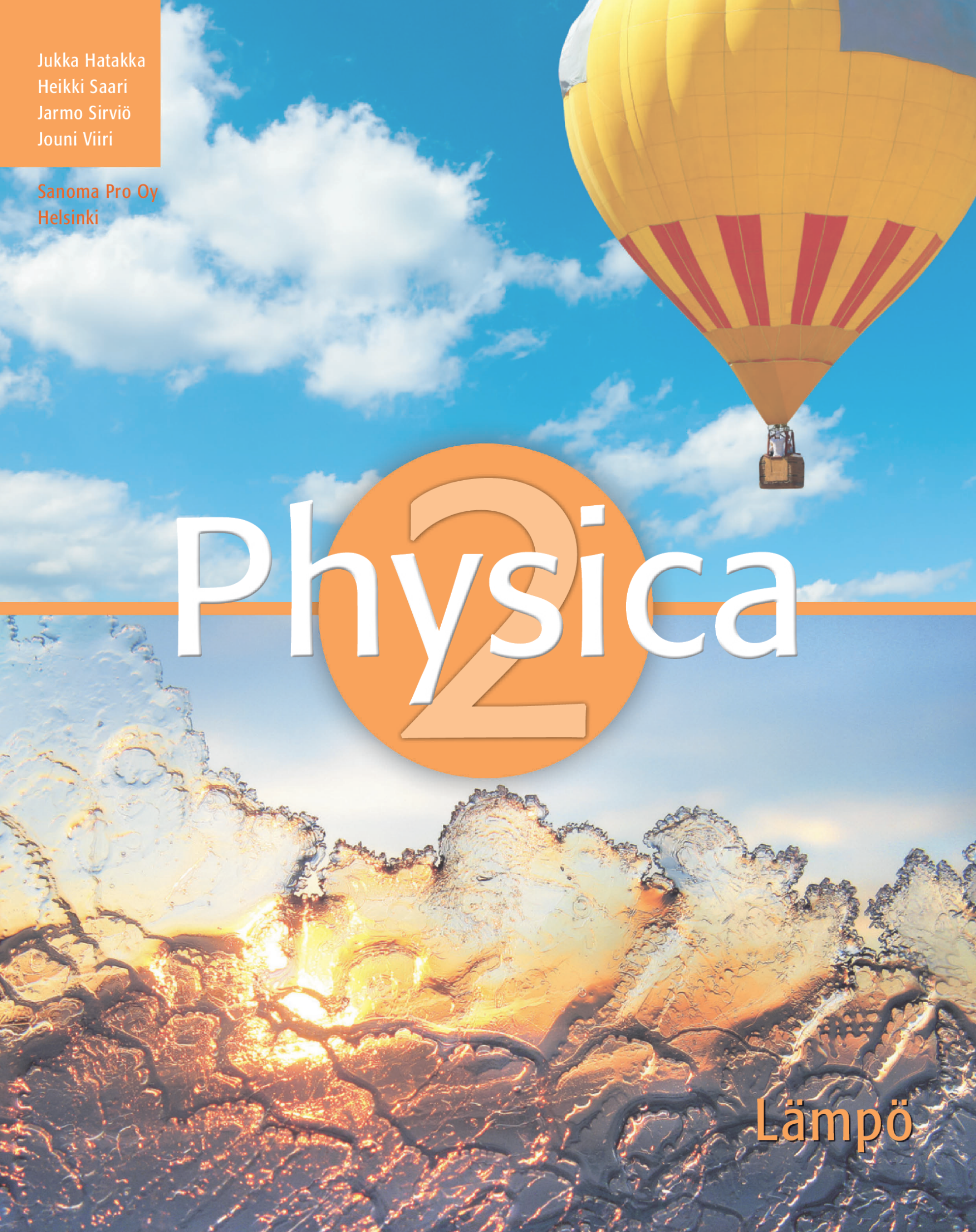
Jukka Hatakka
Heikki Saari
Jarmo Sirviö
Jouni Viiri

Sanoma Pro Oy
Helsinki



Physica 2

Lämpö

Tiedustelut
Sanoma Pro Oy, Helsinki
puh. 020 391 000
sähköposti: asiakaspalvelu@sanomapro.fi

www.sanomapro.fi

Kustantaja: Sanoma Pro Oy

Tämä aineisto on digitaalinen rinnakkaisversio tuotteesta
ISBN 978-952-63-0888-3 Physica 2

12 kk lisenssi ISBN 978-952-63-1907-0
48 kk lisenssi ISBN 978-952-63-1908-7

Toimitus: Eero Taipalus
Ulkoasu: Sari Jeskanen
Taitto: Eija Högman ja Sari Jeskanen
Kuvitus: Pekka Könönen
Kuvatoimitus: Anita Kokkila ja Nina Tuittu

© Heikki Saari, Jarmo Sirviö, Jouni Viiri ja Sanoma Pro Oy

Kopiointiehdot
Tämä teos on digitaalinen oppikirja, joka on suojattu tekijänoikeuslailla (404/61).

Lukijalle

Physica 2 on oppikirja lukion fysiikan toiselle kurssille, joka on fysiikan ensimmäinen syventävä kurssi. Kurssi käsittelee lämpöoppia ja siihen läheisesti liittyvää energian käsitettä. Kirjassa käsitellään mekaanisen energian säilymistä ja muuttumista, lämpöopin keskeisiä suureita, kuten lämpötilaa ja painetta, lämmön siirtymistä ja sitoutumista, kaasujen tilanyhtälöä, lämpöopin pääsääntöjä sekä energian tuottamista ja energian käyttöä.

Fysiikan syventävät kurssit muodostavat kokonaisuuden, jossa käydään läpi fysiikan keskeiset osa-alueet. Tällä ensimmäisellä syventävällä kurssilla perehdytään lämpöoppiin, joka toisaalta selittää monia ympäristössämme ja myös ihmisen elimistössä tapahtuvia ilmiöitä ja toisaalta luo pohjan yhteiskunnan energiahuollolle. Toimiva energiahuolto on nykyaikaisen yhteiskunnan edellytys. Lämpöopin kehitys mahdollisti teollistumisen, ja ne kehittyivät rinnakkain erityisesti 1700- ja 1800-luvuilla.

Yhteiskunnan päättäjät joutuvat jatkuvasti ottamaan kantaa energian tuottamista ja energiahuoltoa koskeviin kysymyksiin ja tekemään niitä koskevia päätöksiä. Tällaisia merkittäviä päätöksiä ei pitäisi tehdä ilman energiaan ja sen tuottamiseen liittyvän fysiikan tuntemista. Myös jokaisen kansalaisen pitäisi tuntea ne fysiikan perustiedot, joihin energian tuottaminen perustuu. Tällä kurssilla käsiteltävän lämpöopin toisen pääsäännön suora seuraus on esimerkiksi se, ettei energiaa voi tuottaa niin, että siitä ei olisi haittaa.

Tässäkin kirjassa fysiikkaa lähestytään Physica-sarjan keskeisten periaatteiden mukaisesti. Ilmiöiden kuvaamiseen ja selittämiseen käytetään monia erilaisia malleja. Lämpöopille on luonteenomaista kahden eri tason mallien käyttäminen. Ilmiöitä kuvataan makroskooppisilla malleilla, joissa käytetään elinympäristömme termodynaamisia systeemejä kuvaavia suureita, kuten lämpötilaa, painetta ja tiheyttä. Ilmiöitä selittävät mallit ovat puolestaan mikroskooppisia malleja, joissa käsitellään aineen rakenneosien ominaisuuksia. Kirjaa kirjoitettaessa on pidetty erityisen tärkeänä sitä, että nämä mallit erottuvat toisistaan selvästi.

Käsitteiden oikeaan määrittelemiseen ja täsmällisen käyttämiseen on tässäkin kirjassa kiinnitetty paljon huomiota. Esimerkiksi usein synonyymeinä käytettyjen lämmön, lämpöenergian, lämpömäärän ja sisäenergian erot on osoitettu selvästi.

Fysiikan syventävien kurssien yhtenä keskeisenä tavoitteena on antaa valmiuksia lukion jälkeisiin opintoihin luonnontieteellisillä ja luonnontieteitä soveltavilla aloilla. Tässä kirjassa fysiikan käsittelytapa on jonkin verran laskennallisempi kuin ensimmäisellä kurssilla.

Joensuussa, Jyväskylässä ja Oulussa
12.10.2012
Tekijät

Sisällys

Mekaniikka ja lämpöoppi täydentävät toisiaan 6
Tapahtumia kuvataan eri tavoin 6
Mekaniikan lähestymistapa on tutkia kappaletta yhtenä kokonaisuutena 6
Lämpöopin lähestymistapa kuvaa myös kappaleen sisäisiä ominaisuuksia 7
Lämpötila voi muuttua ilman lämmittämistä 7

1 Tutkittavaa kohdetta kutsutaan systeemiksi 8
Lämpötila on perussuure 8
Lämpömittareiden toiminta perustuu lämpöilmiöihin 9
Systeemi on tutkittava kohde 9
Tilanmuuttujat kuvaavat systeemiä 10
Systeemiä voidaan kuvata mikro- ja makromalleilla 10
Systeemin sisäistä energiaa kutsutaan sisäenergiaksi 11
Lämpö on siirtyvää energiaa 12

2 Mekaaninen energia on liike- ja potentiaalienergian summa 16
Systeemin energia muuntuu muodosta toiseen 16
Liikkuvalla kappaleella on liike-energiaa 16
Potentiaalienergia riippuu paikasta 17
Potentiaalienergia muuttuu nostossa ja laskussa 17
Mekaaninen energia 18
Mekaanisen energian säilymislaki 19

3 Työ muuntaa mekaanista energiaa 26
Voima tekee työtä 26
Työ on energian siirtoa voimien välityksellä 26
Työ voi olla positiivista tai negatiivista 27
Muuttuvan voiman tekemä työ määritetään fysikaalisena pinta-alana 27
Voiman tekemä työ vaikuttaa mekaaniseen energiaan 28
Mekaniikan energiaperiaate putoamisliikkeessä 28

4 Teho ja hyötysuhde kuvaavat energiansiirtoa 36
Teho ilmoittaa työntekonopeuden 36
Laitteilla on erilaiset tehot 36
Yksinkertainen kone helpottaa työtä 37
Ideaalinen kone ei ole mahdollinen 37
Hyötysuhde on aina pienempi kuin yksi 38
Ihmisen tehokin voidaan mitata 38

5 Lämpötilan muutos vaikuttaa kappaleen ominaisuuksiin 42
Lämpö siirtyy kolmella tavalla 42
Lämpö siirtyy johtumalla aineessa 43
Lämpö siirtyy kuljettumalla aineen mukana 43
Lämpö siirtyy myös säteilemällä 43
Lämpötila vaikuttaa kappaleen kokoon 44
Pituus muuttuu lämpötilan muuttuessa 45
Pinta-ala ja tilavuus muuttuvat lämpötilan muuttuessa 46
Lämpölaajeneminen selitetään mikromallin avulla 46
Veden lämpölaajeneminen poikkeaa muista nesteistä 47

6 Voima aiheuttaa paineen 53
Voiman vaikutuspinta-alalla on merkitystä 53
Paine kuvaa voiman jakautumista vaikutuspinnalle 54
Paineen yksikkö on pascal 54
Ulkoinen paine leviää tasaisesti nesteissä ja kaasuissa 55
Mikromalli selittää nesteiden ja kaasujen paineen ominaisuudet 55
Hydrauliikassa voima välittyy nesteen avulla 56

7 Aineen oma paino aiheuttaa paineen 60
Ilmanpaine aiheutuu ilman omasta painosta 60
Hydrostaattinen paine aiheutuu nesteen omasta painosta 61
Kokonaispaine nesteessä on ilmanpaineen ja hydrostaattisen paineen summa 61
Ilmanpaine havaitaan voimavaikutuksen kautta 62
Paineen mittaaminen perustuu voimavaikutukseen 62
Pumpun toiminta perustuu paine-eroihin 63

8 Kaasun paine, tilavuus ja lämpötila riippuvat toisistaan 67
Kaasujen ominaisuudet poikkeavat nesteistä ja kiinteistä aineista 67
Ideaalikaasu on teoreettinen mallikaasu 68
Kaasun tilanmuutosta kuvaa tilanyhtälö 68
Ideaalikaasun tilanyhtälö 69

9 Kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä saadaan kolme kaasulakia 73
Isotermisessä muutoksessa lämpötila on vakio 73
Boylen lain kokeellinen todentaminen 73
Boylen lain pätevyysalue riippuu kaasusta 74
Isokoorisessa tilanmuutoksessa tilavuus on vakio 75
Isobaarisessa tilanmuutoksessa paine on vakio 76
Kaasulait selitetään mikromallien avulla 76

10 Lämpö on siirtyvää energiaa 84
Lämpötilat tasoittuvat 84
Lämpömäärä on siirtyvän energian määrä 85
Lämpötilat tasoittuvat lämmön siirtyessä 86
Kappaleen lämpökapasiteetti määritetään kokeellisesti 86
Vedellä on suuri ominaislämpökapasiteetti 86

11 Aineella on kolme olomuotoa 93
Olosuhteet ja rakenneosien väliset sidokset määräävät aineen olomuodon 93
Lämpötila ei muutu olomuodon muutoksissa 94
Energiaa sitoutuu ja vapautuu olomuodon muutoksissa 95
Mikromallit selittävät olomuodon muutokset 96

12 Aineen olomuoto riippuu paineesta ja lämpötilasta 103
Paine vaikuttaa sulamis- ja kiehumispisteisiin 103
Faasikaavio kuvaa aineen olomuotoja eri paineissa ja lämpötiloissa 104
Tasapainokäyrät kohtaavat kolmoispisteessä 104
Höyrystyminen tapahtuu kahdella tavalla 105
Samaa tapahtumaa kuvataan eri kaavioilla 106
Ilmankosteus on ilmassa höyrynä olevaa vettä 107

13 Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö 112
Systeemin sisäenergiaa voidaan muuttaa kahdella tavalla 112
Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö määrittelee sisäenergian muutoksen 113
Sisäenergian muutos voidaan havaita 113
Laajeneva kaasu tekee työtä 114
Kaasun tilanmuutoksia kuvataan graafisesti 115
Koneet muuntavat energiaa muodosta toiseen 116
Systeemi palaa alkutilaansa kiertoprosessin jälkeen 116
Lämpövoimakone käyttää lämmön työhön 117

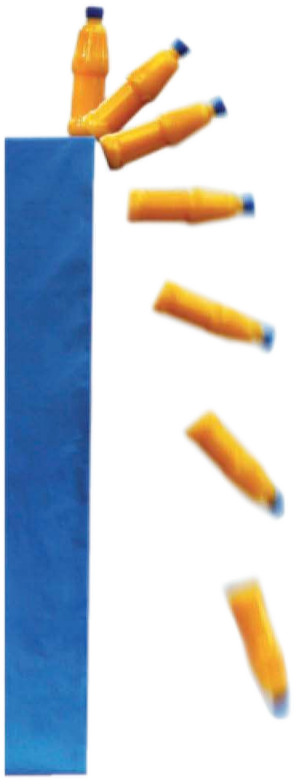
14 Lämpöopin toinen pääsääntö 123
Termodynaamiset systeemit suuntautuvat tasapainoon 123
Entropia ilmoittaa ilmiöiden suunnan 124
Energia huononee, kun se muuntuu lämpöenergiaksi 124
Kaikkea lämpöä ei voi muuttaa työksi 125

15 Lämpöpumppu siirtää lämpöä 127
Jäähdytyskone ottaa lämpöä kylmäsäiliöstä 127
Jääkaappi on jäähdytyskone 128
Lämpöpumppua käytetään talojen lämmitykseen 128
Ilmalämpöpumppu lämmittää ja jäähdyttää asuntoja 129

16 Yhteiskunta tarvitsee energiaa 132
Energiantarve kasvaa 132
Energiaa tuotetaan monista energialähteistä 133
Energialähteet jaetaan uusiutuviin ja uusiutumattomiin 133
Energia muuntuu voimalaitoksissa 134
Uusiutuvien energialähteiden käyttöä kehitetään 135
Fuusio voi olla tulevaisuuden energiaratkaisu 136

Kertaustehtävät 139
Tehtävien vastaukset 143
Hakemisto 145

Mekaniikka ja lämpöoppi täydentävät toisiaan



Virvoitusjuomapullon putoamista voidaan kuvata sekä mekaniikan että lämpöopin menetelmillä. Kuvasta voidaan määrittää pullon nopeus ja kiihtyvyys.

Mekaniikan lähestymistavassa kohdetta tutkitaan yhtenä kokonaisuutena. Mekaniikan lähestymistavassa ei tutkita kappaleen sisäistä rakennetta eikä sen muutoksia.

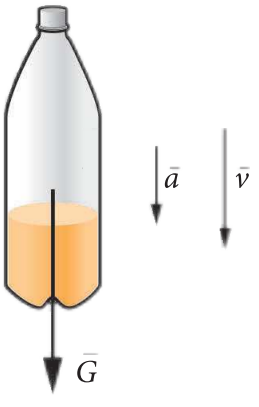
Tapahtumia kuvataan eri tavoin

Samaa ilmiötä kuvataan monella eri tavalla. Tässä kirjassa tutustutaan sekä mekaniikan että lämpöopin tapaan kuvata ilmiöitä. Samalla havaitaan, että nämä liittyvät saumattomasti toisiinsa ja täydentävät toisiaan.

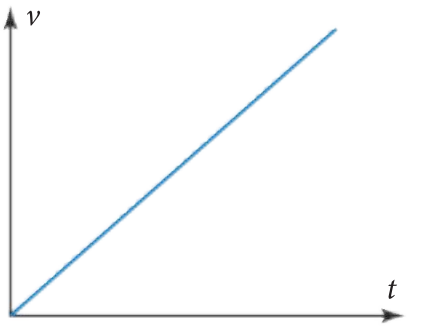
Tarkastellaan tilannetta, jossa virvoitusjuomapullo putoaa tönäisyn seurauksena pöydältä. Pullon nopeus kasvaa putoamisen aikana. Kun pullo osuu maahan, sen liike pysähtyy. Miten tätä tapahtumaa kuvataan? Yksinkertaisin tapa on todeta, että pullo putosi lattialle. Tällainen toteamus ei kuitenkaan anna juurikaan tietoa itse tapahtumasta. Pullon putoamista voidaan tarkastella sekä **mekaniikan** että **lämpöopin** näkökulmasta.

Mekaniikan lähestymistapa on tutkia kappaletta yhtenä kokonaisuutena

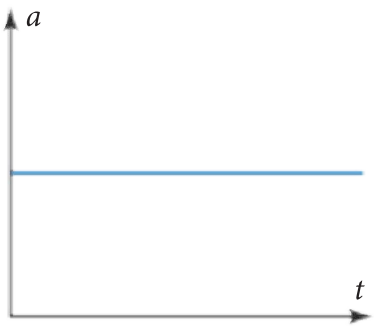
Mekaniikassa tarkastellaan esimerkiksi sitä, miksi virvoitusjuomapullon liike on kiihtyvää, kun se putoaa lattialle. Samoin voidaan tarkastella energian muuntumista putoamisen aikana. Näiden tarkasteluiden avulla saadaan lasketuksi, millä nopeudella pullo osuu lattiaan. Mekaniikan lähestymistavassa ei tarvita tietoa aineen rakenneosista ja niiden ominaisuuksista. Tästä syystä se ei myöskään kerro, miten kappaleen sisäiset ominaisuudet muuttuvat eri tilanteissa.



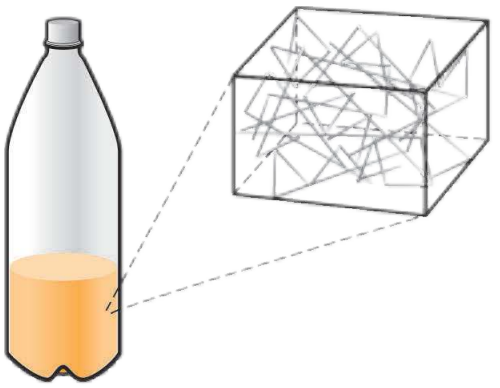
Pulloon vaikuttava Maan vetovoima saa aikaan kiihtyvän liikkeen.



Pullon nopeus kasvaa tasaisesti.



Pullon kiihtyvyys on vakio.



Virvoitusjuoman rakenneosat ovat jatkuvassa liikkeessä. Sik-sak-viivat kuvaavat rakenneosien kulkemaa matkaa.

Lämpöopin lähestymistavassa kuvataan kohteen sisäisiä ominaisuuksia.

Lämpötila *T*, paine *p* ja tilavuus *V* vaikuttavat aineen ominaisuuksiin.

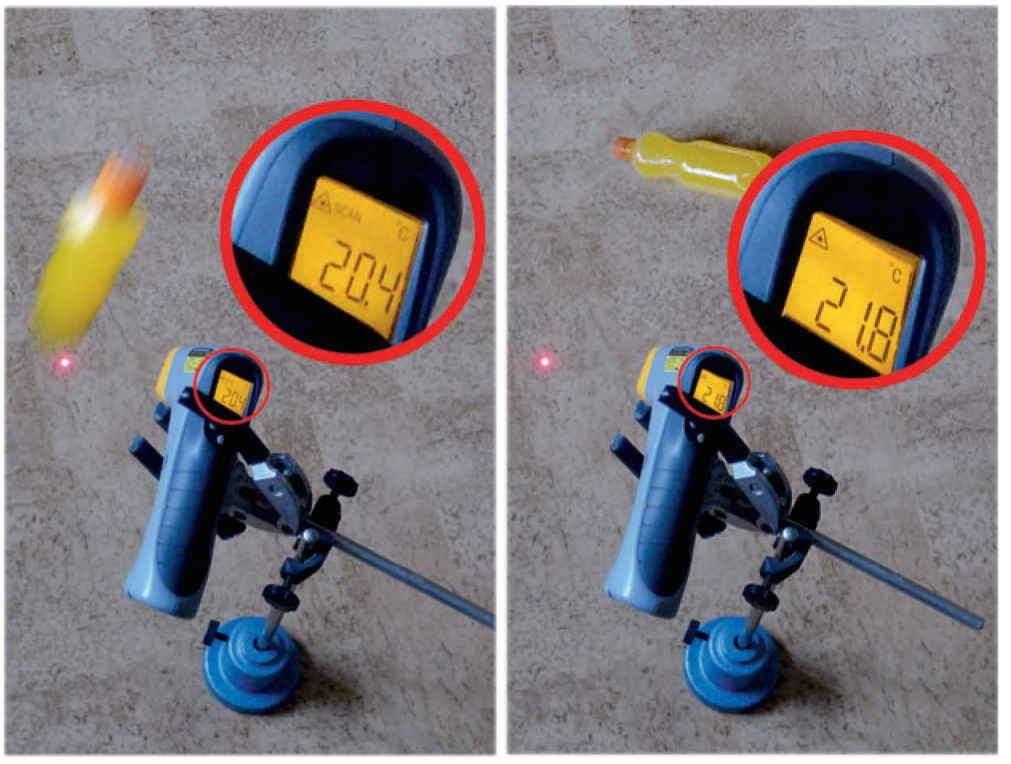
Lämpöopin lähestymistapa kuvaa myös kappaleen sisäisiä ominaisuuksia

Lämpöopin lähestymistavassa kuvataan kohteen sisäisiä ominaisuuksia ja sitä, miten ne muuttuvat eri tilanteissa. Virvoitusjuomapullon putoaminen ei sinänsä vaikuta pullon sisällä olevan juoman ja kaasun ominaisuuksiin. Pullon osuminen lattiaan aiheuttaa muutoksia pullon muodossa sekä juoman ja kaasun ominaisuuksissa. Pullon osuessa lattiaan sen nopeus muuttuu nollaksi. Tällöin myös pullon liike-energia näyttää häviävän. Energian säilymislaki kertoo, että energia ei häviä. Energia voi kuitenkin muuntua toiseen muotoon.

Lämpötila voi muuttua ilman lämmittämistä

Kun lattian, pullon ja sen sisältämän juoman lämpötilat mitataan tarkasti ennen ja jälkeen törmäyksen, havaitaan niiden lämpötilojen kasvaneen törmäyksessä. Havainto selitetään siten, että törmäyksessä pullon liike-energia muuntuu pullon, juoman ja lattian rakenneosien liike-energiaksi eli lämpöenergiaksi. Rakenneosien liike-energian kasvaminen havaitaan lämpötilojen nousuna.

Lämpöopin lähestymistapa kuvaa myös, miten lämpötilan, paineen tai tilavuuden muuttaminen vaikuttaa tutkittavan kohteen ominaisuuksiin. Ikkunalaudalle aurinkoon jätetty virvoitusjuomapullo on vaarallinen, sillä lämpötilan nousu lisää painetta pullon sisällä. Seurauksena pullo voi jopa räjähtää.



Sekä lattian että pullon lämpötila muuttuu, kun pullo osuu lattiaan. Lattian lämpötila mitataan infrapunalämpömittarilla.

1 Tutkittavaa kohdetta kutsutaan systeemiksi

Pöydälle jätetty kuuma kahvi jäähtyy huoneen lämpötilaan.

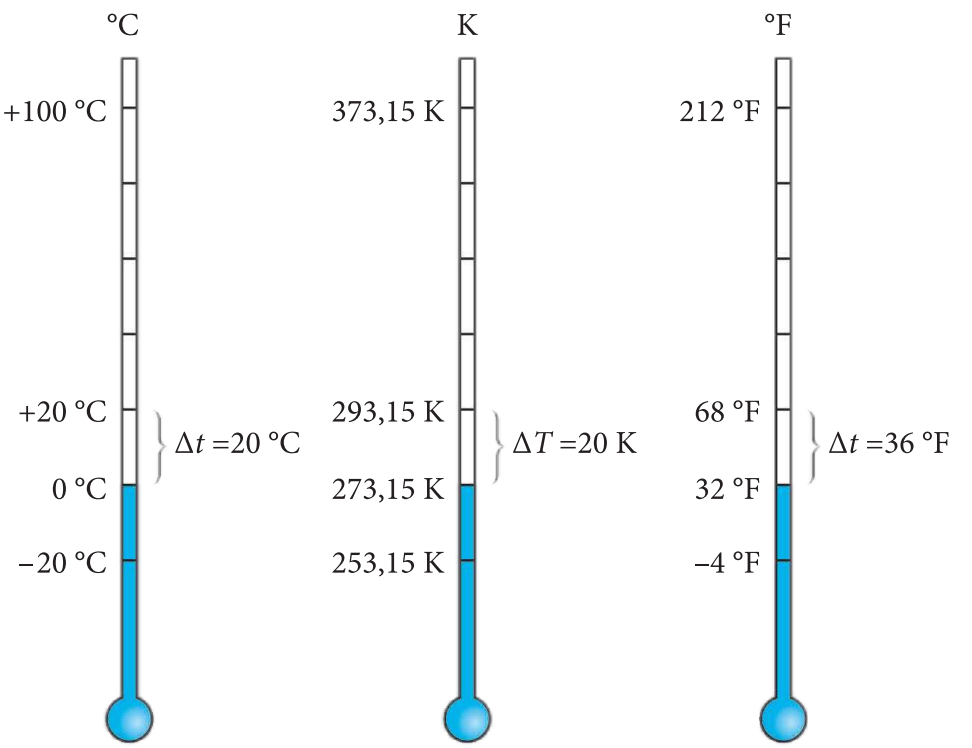
Lämpötila
Lämpötila on suure, joka kuvaa, kuinka kylmä tai kuuma kohde on.
Lämpötilan tunnus on *T* ja sen SI-järjestelmän mukainen yksikkö on kelvin, jonka tunnus on K.

Lämpötila on perussuure

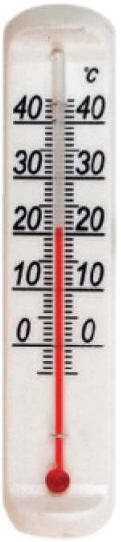
Huoneessa oleva lämpömittari näyttää huoneen lämpötilan. Kun mittarin pää laitetaan kuumaan kahviin, mittarin lukema kasvaa ja samalla kahvin lämpötila laskee hieman. Jonkin ajan kuluttua lämpömittarin ja kahvin lämpötila on sama. Tällöin mittari ja kahvi ovat **lämpötasapainossa**. Lämpötila voidaan lukea mittariasteikolta, kun tasapainotila on saavutettu.

Lämpötila on keskeinen mitattava ominaisuus eli suure **lämpöopissa** eli **termodynamiikassa**. Lämpötilan käsite perustuu mielikuvaan kuumasta ja kylmästä. Kappaleiden lämpötilaa voidaan vertailla esimerkiksi tuntoaistin avulla. Aistimukseen perustuvat kuvailut lämpötilasta ovat epätarkkoja, ja siksi lämpötilan mittaamiseen on kehitetty lämpömittareita.

Lämpötilan tunnus on T ja sen SI-järjestelmän mukainen yksikkö **kelvin** K. Yksikkönä käytetään usein myös **celsiusasteita** °C, jolloin lämpötilasta käytetään tunnusta t. Koska t on myös ajan tunnus, lämpötilan tunnuksena voidaan käyttää tunnusta θ (theta). Näin ei ole vaarana, että aika ja lämpötila sekoittuisivat.



Lämpötilamuunnokset eri asteikkojen välillä:
***T* = (*t* + 273,15) K, missä *t* on luku, joka ilmaisee lämpötilan celsiusasteina.**
***t* = (*T* − 273,15) °C, missä *T* on luku, joka ilmaisee lämpötilan kelvineinä.**
20 °C:n lämpötilaero vastaa 20 K:n lämpötilaeroa, $\Delta t = \Delta T$.



Nestelämpömittari

Kaksoismetallilämpömittari

Sähköinen lämpömittari

Infrapuna-lämpömittari

Lämpömittareiden toiminta perustuu lämpöilmiöihin

Nestelämpömittari koostuu nestesäiliöstä, säiliöön liitetystä putkesta ja putken viereen asetetusta asteikosta. Mittarin toiminta perustuu nesteen lämpölaajenemiseen. Kun mitattava lämpötila nousee, nesteen tilavuus kasvaa ja neste nousee putkessa. Nesteenä käytetään yleisesti värjättyä petrolia ja etanolia.

Kaksoismetallilämpömittari perustuu metallien erilaiseen lämpölaajenemiseen. Metallikierukassa on toisiinsa kiinnitetty, kahdesta eri metallista tehdyt liuskat. Liuskat voivat olla esimerkiksi terästä ja kuparia. Kierukka vääntyy eri lämpötiloissa eri asentoihin ja kääntää viisaria, koska metalleilla on eri lämpölaajenemiskerroin.

Sähköinen lämpömittari voi perustua kahdesta metallista muodostettuun termoelementtiin, jonka jännite riippuu mitattavasta lämpötilasta. Myös lämpötilaan reagoivia lämpövastuksia käytetään lämpömittareina.

Infrapunalämpömittari mittaa kohteen lähettämää lämpösäteilyä. Kaikki kappaleet säteilevät lämpösäteilyä, joka on näkyvää valoa pitkäaaltoisempaa säteilyä.

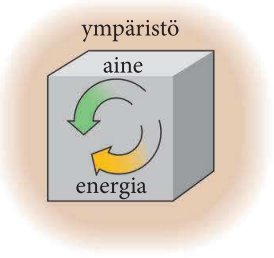
Systeemi ja ympäristö
Tutkittavaa kohdetta sanotaan **systeemiksi** ja tarkastelun ulkopuolelle jäävää osaa **ympäristöksi**.

Systeemi on tutkittava kohde

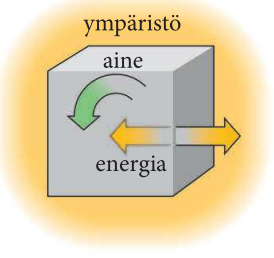
Lämpöopissa tutkittavaa kohdetta tarkastellaan lämpöilmiöiden näkökulmasta. Silloin tutkitaan muun muassa sitä, miten lämmittäminen, jäähdyttäminen tai puristaminen vaikuttaa kohteen ominaisuuksiin. Tarkastelun kohteena eli **systeeminä** voi esimerkiksi olla pullossa oleva juoma tai jarruttava auto. Tapauskohtaisesti on päätettävä, mitä kaikkea kuuluu tarkasteltavaan systeemiin ja mitä sen ympäristöön eli kuinka suurta kokonaisuutta kulloinkin tarkastellaan.

Termodynaamiset systeemit jaetaan kolmeen perustyyppiin: **eristettyyn**, **suljettuun** ja **avoimeen**. Todellisuudessa systeemi ei koskaan ole täysin eristetty. Energian ja aineen vaihto ympäristön kanssa voi kuitenkin olla niin vähäistä, että systeemiä voi pitää eristettynä. Jako erilaisiin systeemeihin on esimerkki mallintamisesta, joka on ominaista fysiikassa. Se yksinkertaistaa systeemien tarkastelua.

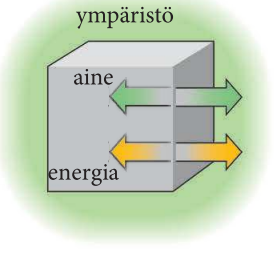
Systeemi on eristetty, jos se ei vaihda ainetta eikä energiaa ympäristönsä kanssa.



Systeemi on suljettu, jos se vaihtaa ympäristönsä kanssa energiaa mutta ei ainetta.



Systeemi on avoin, jos sekä aineen että energian vaihto ympäristön kanssa on mahdollista.



Systeeminä on auto ja tie.

Systeeminä on auto.

Tilanmuuttujat
Tilanmuuttujiksi kutsutaan seuraavia suureita: lämpötila *T*, paine *p*, tilavuus *V* ja ainemäärä *n*.

Tilanmuutos
Tilanmuutoksessa yhden tilanmuuttujan arvon muuttaminen aiheuttaa ainakin yhden muun tilanmuuttujan arvon muuttumisen.

Mikrotason malleilla selitetään ja ennustetaan makrotason ilmiöt.

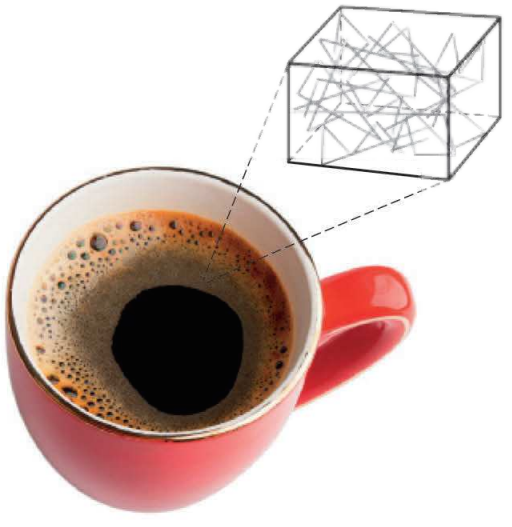
Atomilla ei ole lämpötilaa eikä painetta. Lämpötila ja paine kuvaavat aineen makroskooppisia ominaisuuksia.

Tilanmuuttujat kuvaavat systeemiä

Helium-kaasulla täytetty pallo on termodynaaminen suljettu systeemi. Pallon **tilan** eli sen olosuhteet määräytyvät sen mukaan, mikä on pallon tilavuus, pallossa olevan kaasun ainemäärä, kaasun lämpötila ja paine. Näitä suureita kutsutaan **tilanmuuttujiksi**. Ainemäärä kuvaa systeemin rakenneosien lukumäärää ja sen yksikkö on mooli (mol).

Kun palloa puristetaan, muuttuu pallon sisällä olevan kaasun tilavuus. Pallon tilavuus pienenee, ja siksi pallon sisällä oleva kaasun paine kasvaa. Kun yksi tilanmuuttujista muuttuu, saa myös vähintään yksi muu tilanmuuttuja uuden arvon. Tällöin systeemi siirtyy uuteen tilaan. Tällaista tapahtumaa jossa termodynaaminen systeemi siirtyy tilasta toiseen sanotaan **tilanmuutokseksi**.

Kun pallon tilavuus muuttuu, myös sen paine muuttuu. Pallossa olevan kaasun tila muuttuu.



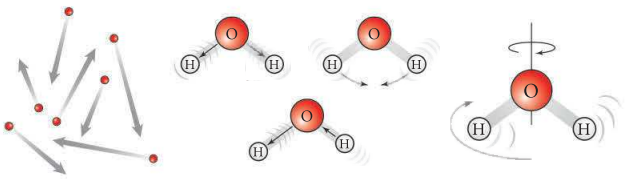
Mitä lämpimämpää kahvi on, sitä suurempi on sen rakenneosien keskimääräinen nopeus.

Systeemiä voidaan kuvata mikro- ja makromalleilla

Kahvikupissa olevaa kahvia voidaan kuvata konkreettisilla, aistein havaittavilla ominaisuuksilla. Lisäksi siitä voidaan mitata esimerkiksi lämpötilaa ja tilavuutta. Tällaista lähestymistapaa, jossa kohdetta kuvataan aisteinkin havaittavilla ominaisuuksilla, sanotaan **makrotason** kuvaukseksi.

Makrotason kuvaus ei usein riitä selittämään ilmiöitä. Ilmiön selittämiseen tarvitaan tietoa aineen rakenteesta. Aineet koostuvat atomeista ja molekyyleistä, joita ei nähdä. Aineen makroskooppiset ominaisuudet selitetään tarkastelemalla atomien ja molekyylien liikettä ja vuorovaikutuksia. Malleja, joissa havaittavia ilmiöitä selitetään aineen rakenneosien avulla, sanotaan **mikrotason** malleiksi. Esimerkiksi kahvin lämpötila selitetään kahvijuoman rakenneosien liikkeen avulla.

Sisäenergia



Systeemin sisäenergia on sen rakenneosien liikkeeseen ja vuorovaikutuksiin liittyvää energiaa.

Sisäenergian muutos on systeemin mikroskooppisten rakenneosien liike- ja potentiaalienergioiden muutosten summa.

Systeemin sisäistä energiaa kutsutaan sisäenergiaksi

Lämpöopissa tarkastellaan systeemin sisäisiä ominaisuuksia. Systeemin sisäistä energiaa kutsutaan **sisäenergiaksi**, ja sen symboli on *U*. Mikrotasolla tarkasteltuna sisäenergia on rakenneosien liikkeisiin ja vuorovaikutuksiin liittyvää energiaa. Systeemin rakenneosia ovat esimerkiksi atomit ja molekyylit. Ne etenevät, pyörivät ja värähtelevät. Näistä liikkeistä muodostuu mikroskooppisten rakenneosien liike-energia.

Systeemin mikroskooppisten rakenneosien potentiaalienergia on rakenneosien sisäisten kemiallisten sidosten energiaa ja rakenneosien välisten kemiallisten sidosten energiaa. Sisäenergia muuttuu vain, jos systeemi on vuorovaikutuksessa ympäristönsä kanssa. Täten eristetyn systeemin sisäenergia on vakio.

Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö käsittelee systeemin sisäenergian muutosta. Sen mukaan systeemin sisäenergiaa lisätään systeemin ulkopuolelta tuotavalla energialla, esimerkiksi **lämmittämällä** systeemiä tai **tekemällä siihen työtä**. Systeemin sisäenergia voi myös pienentyä. Näin tapahtuu, jos systeemistä poistuu energiaa lämpönä tai jos systeemi tekee työtä. Sisäenergian muutos näkyy makrotasolla esimerkiksi lämpötilan, paineen tai tilavuuden muuttumisena.

Energiaa siirtyy systeemiin lämpönä.

Termospullo on eristetty systeemi, koska siitä ei poistu eikä siihen siirry ainetta eikä energiaa.

Tiiviisti suljettu juomapullo on esimerkki suljetusta systeemistä. Aineen määrä pysyy vakiona, mutta energiaa siirtyy joko pulloon tai pullosta pois.

Kuumaa kahvia täynnä oleva kuppi on avoin systeemi. Siitä poistuu ainetta vesihöyrynä ja energiaa lämpönä.

Lämpö
Lämpö on kappaleiden lämpötilaerosta aiheutuvaa kuumemmasta kappaleesta kylmempään siirtyvää energiaa.

Lämpö siirtyy kuumasta lämpöpatterista käteen.

Lämpö siirtyy lämpimästä kädestä kylmään lumeen.

Lämpö on siirtyvää energiaa

Mikrotasolla sisäenergian sitä osaa, jonka muodostaa rakenneosien liike-energia, kutsutaan systeemin **lämpöenergiaksi**. Kun mikrotasolla puhutaan systeemin energiasta, viitataan sisäenergiaan. Makrotasolla tarkastelun kohteena on koko kappale eikä sen mikro-osat, eli lämpöenergiaa ei voida määritellä.

Lämpötilaerojen takia kahden systeemin välillä voi siirtyä energiaa. Tätä siirtyvää energiaa kutsutaan **lämmöksi**. Kun kuuma ja kylmä käsi asetetaan vastakkain, kuumasta kädestä siirtyy lämpöä kylmään ja käsien lämpötilaero tasoittuu.

	Makrotaso	**Mikrotaso**
Kohde	aine tai systeemi kokonaisuutena	rakenneosat, joista aine koostuu
Tilaa kuvaavat suureet	p, T, n ja V	rakenneosien liike- ja potentiaalienergiat
Sisäenergia	riippuu p, T ja V	rakenneosien liike- ja potentiaalienergioiden summa
Lämpöenergia		rakenneosien liike-energioiden osuus
Lämpö	siirtyvää energiaa	lämpötilaerosta aiheutuvaa siirtyvää energiaa

Esimerkki 1 — Lämpötila-asteikkojen muuntaminen

a) Ihmisen normaali lämpötila on 37 °C. Kuinka paljon se on kelvineinä?
b) Raudan sulamispiste on 1 808 K. Kuinka paljon se on celsiusasteina?

Ratkaisu

a) $t = 37\ °C$, $T = ?$

Celsiusasteet muunnetaan kelvineiksi muuntokaavalla $T = (t + 273{,}15)\ K$. Sijoitetaan tunnettu lämpötila muuntokaavaan:

$$T = (37 + 273{,}15)\ K$$
$$= 310{,}15\ K \approx 310\ K.$$

b) $T = 1\ 808\ K$, $t = ?$

Kelvinit muunnetaan celsiusasteiksi muuntokaavalla $t = (T - 273{,}15)\ °C$. Sijoitetaan tunnettu lämpötila muuntokaavaan:

$$t = (1808 - 273{,}15)\ °C$$
$$= 1534{,}85\ °C \approx 1535\ °C.$$

Vastaus

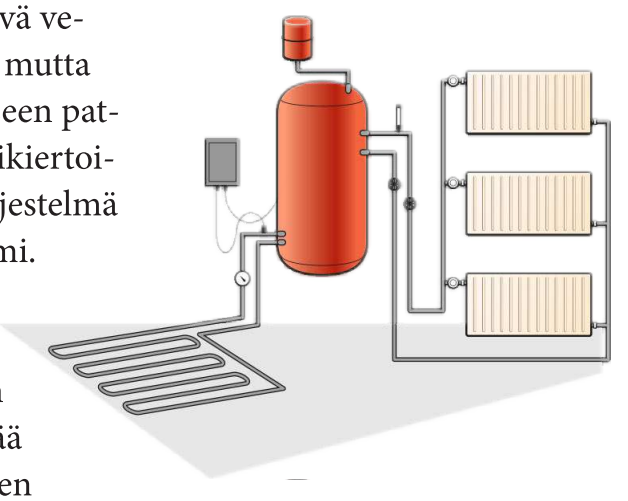
a) Ihmisen lämpötila on noin 310 K.
b) Rauta sulaa noin 1 535 °C:n lämpötilassa.

Esimerkki 2

Termodynaaminen systeemi ja tilanmuuttujat

a) Millainen termodynaaminen systeemi on vesikiertoinen keskuslämmitysjärjestelmä?
b) Mitä tilanmuuttujia sen kuvaamiseen tarvitaan?

Ratkaisu



a) Vesikiertoisessa keskuslämmitysjärjestelmässä kiertävä vesimäärä pysyy samana, mutta lämpöä siirtyy huoneeseen pattereista ja putkista. Vesikiertoinen keskuslämmitysjärjestelmä on siten suljettu systeemi.

b) Keskuslämmitysjärjestelmän toiminnan kannalta on tärkeä tietää lähtevän ja tulevan veden lämpötilat sekä kattilassa vallitseva paine. Myös järjestelmän laajuus eli tilavuus on tiedettävä.

Vastaus

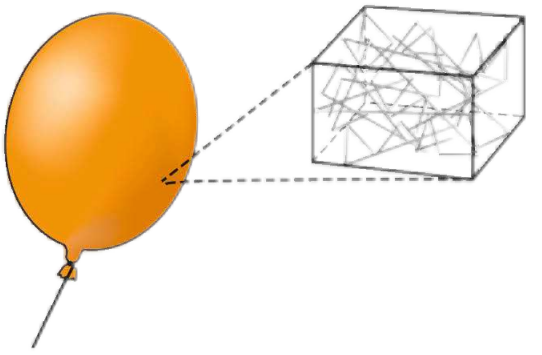
a) Systeemi on suljettu.
b) Järjestelmän kuvaamiseen tarvitaan lämpötila, paine ja tilavuus.

Esimerkki 3

Systeemin sisäenergia ja systeemin tilanmuutos

a) Miten ilmapallossa olevan ilman tilaa kuvataan makrotasolla?
b) Miten ilmapallossa olevan ilman tilaa selitetään mikrotasolla?
c) Miten systeemin sisäenergia ja tila muuttuvat, kun pallo tuodaan ulkoa pakkasesta lämpimään sisäilmaan?

Ratkaisu



a) Makrotasolla tarkasteltaessa ilmapallolla on tietty lämpötila, paine ja tilavuus.

b) Mikrotasolla tarkasteltaessa ilmapallon makroskooppiset ominaisuudet selitetään rakenneosien liikkeen avulla. Rakenneosat ovat jatkuvassa liikkeessä, josta aiheutuu pallon sisällä olevan kaasun paine. Paine on sitä suurempi mitä suurempi nopeus rakenneosilla on ja mitä enemmän törmäyksiä pallon kuoreen tapahtuu aikayksikössä. Tietyssä lämpötilassa ja paineessa pallon sisällä oleva ilma vaatii tietyn tilavuuden.

c) Koska pallon ulkopuolella lämpötila on nyt suurempi kuin pallon sisällä, lämpöä siirtyy lämpötilaeron vuoksi pallon sisään. Lämpö on siirtyvää energiaa, ja siten pallon sisällä olevan ilman sisäenergia kasvaa. Sisäenergian muutos havaitaan sekä pallon sisältämän ilman lämpötilan kasvuna, että pallon sisällä olevan paineen kasvuna. Koska pallon sisäinen paine kasvaa, myös pallon tilavuus kasvaa.

Tiivistelmä

- Lämpötila on perussuure.
- Lämpömittareiden toiminta perustuu lämpöilmiöihin.
- Systeemi on tutkittava kohde.
- Tilanmuuttujat kuvaavat systeemiä.
- Systeemiä voidaan kuvata mikro- ja makromalleilla.
- Systeemin sisäistä energiaa kutsutaan sisäenergiaksi.
- Lämpö on siirtyvää energiaa.

Perustehtävät

1. Arvioi, kuinka suuria lämpötiloja esiintyy seuraavissa kohteissa:
a) pakastin
b) kynttilän liekki
c) hehkulamppu
d) kuuma vesijohtovesi

2. Määrittele seuraavat käsitteet:
a) lämpö
b) lämpöenergia
c) sisäenergia.

3. Selitä, mitä tarkoittaa
a) tilanmuuttujat
b) tilan muuttuminen.

4. **a)** Mihin aineen mikromalleja käytetään?
b) Kerro esimerkki mikromallista.

5. Avaruuden taustasäteilyn lämpötila on 2,73 K. Mikä tämä lämpötila on celsiusasteina? Esim. 1

6. Suomen ylin lämpötila 37,2 °C mitattiin Joensuun lentoasemalla 29.7.2010. Alin lämpötila –51,5 °C mitattiin Kittilän Pokassa 28.1.1999.
a) Muunna lämpötilat kelvineiksi.
b) Laske lämpötilaero celsiusasteina.
c) Laske lämpötilaero kelvineinä.
d) Mitä huomaat b- ja c-kohtien vastauksista?
Esim. 1

7. Muunna kelvineiksi
a) asetonin sulamispiste –94,3 °C
b) raudan sulamispiste 1 535 °C
c) rikkihapon kiehumispiste 326 °C. Esim. 1

8. Suljettu lääkeruisku on puolillaan ilmaa. Miten saat aikaan tilanmuutoksen, jossa
a) paine kasvaa
b) lämpötila kasvaa
c) paine pienenee? Esim. 3

Soveltavat tehtävät

9. Arvioi, millainen systeemi on
a) sukelluksissa oleva sukellusvene
b) henkilöauto
c) jääkaappi.

10. Pohdi, mitä ominaisuuksia vaaditaan lämpömittarilta.

11. Hiilihappoa sisältävä virvoitusjuoma on suljetussa pullossa.
a) Mitkä tilanmuuttujat kuvaavat tilannetta?
b) Kuvaile tilanmuuttujia käyttäen, miten virvoitusjuoman tila muuttuu, kun pulloa ravistellaan voimakkaasti.
c) Mikä kokeellinen havainto tukee päätelmääsi?

12. Kaasua voidaan kuvata mikromallilla, jossa kaasu koostuu rakenneosista. Ne vuorovaikuttavat vain törmätessään toisiinsa tai astian seiniin. Mistä makrotasolla havaitaan
a) rakenneosien nopeuden kasvaminen
b) sisäenergian pieneneminen?

13. Suljetussa astiassa olevan kaasun sisäenergian kasvu havaitaan kaasun paineen kasvamisena. Kerro kaksi tapaa, jolla sisäenergiaa voidaan kasvattaa.

14. Korkein virallinen Amerikan mantereella mitattu lämpötila oli eräänä vuonna 134 °F. Se mitattiin Death Valleyssa, Kaliforniassa.
Kuinka paljon se on celsiusasteina?
Käytä apuna taulukkokirjaa.

15. Lämpötila vaihtelee Kuussa 375 kelvinistä päivällä $1{,}00 \cdot 10^2$ kelviniin yöllä. Muunna lämpötilat celsiusasteiksi.

16.

a) Millä suureilla ilmapallon tilaa voidaan kuvata?
b) Mitä pallolle on tapahtunut?
c) Mitkä tilanmuuttujat ovat muuttuneet?

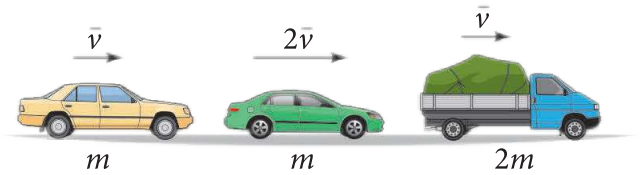
2 Mekaaninen energia on liike- ja potentiaalienergian summa

Liike-energia

$E_k = \frac{1}{2}mv^2$,

jossa
m on kappaleen massa ja
v on kappaleen nopeus.

Huomaa!
Merkintä $[E_k]$ tarkoittaa liike-energian yksikköä.



Nopeus	Massa	Liike-energia
v	m	E_k
$2v$	m	$4E_k$
v	$2m$	$2E_k$

Kun kappaleen nopeus kaksinkertaistuu, niin liike-energia nelinkertaistuu. Kun kappaleen massa kaksinkertaistuu, niin liike-energia kaksinkertaistuu.

Systeemin energia muuntuu muodosta toiseen

Tutkitaan keinujaa mekaniikan lähestymistavalla. Keinu ja keinuja muodostavat tarkasteltavan systeemin. Systeemin energia muuntuu muodosta toiseen heilahduksen aikana. Heilahduksen ylimmässä kohdassa systeemin energia on paikkaan liittyvää energiaa ja alimmassa kohdassa taas liikkeeseen liittyvää energiaa. Jos keinujalle ei anneta enää vauhtia, liike vaimenee ja energia muuntuu ilman ja keinun ketjun kiinnityskohdan sisäenergiaksi.

Liikkuvalla kappaleella on liike-energiaa

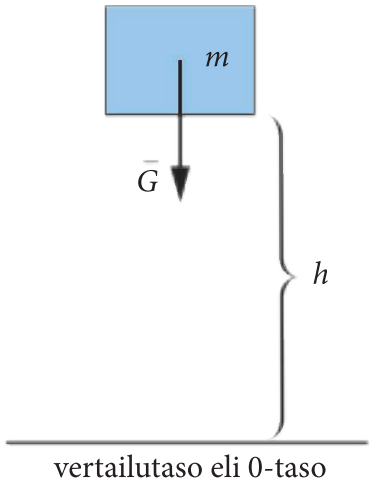
Suurella nopeudella keinuvan keinujan pysäyttäminen ei ole helppoa, sillä hänellä on liikkeestä johtuvaa energiaa eli **liike-energiaa**. Kappaleen liike-energia on sitä suurempi, mitä suurempia sen massa m ja nopeus v ovat. Nopeudella v liikkuvan kappaleen liike-energia on $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Jos kappale on paikallaan, sillä ei ole liike-energiaa.

Liike-energian yksikkö on sama kuin kaikkien muidenkin energiamuotojen eli joule.

$$[E_k] = [m] \cdot [v]^2 = 1\ \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 1\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} = 1\ \text{J}$$

Kappaleen liike-energia eli **kineettinen energia** on aina positiivinen, sillä sekä kappaleen massa että sen nopeuden neliö ovat positiivisia.

Keinuja liikkuu alhaalla suurella nopeudella ja nousee korkeuksiin hidastuen. Liike pysähtyy hetkellisesti ääriasemassa ja heilahduksen suunta muuttuu.



Kappaleen potentiaalienergia
$E_p = mgh$,
jossa
m on kappaleen massa,
g on putoamiskiihtyvyys ja
h on kappaleen etäisyys vertailutasosta eli nollatasosta.

Potentiaalienergia riippuu paikasta

Energia, jonka suuruus riippuu kappaleen paikasta, on **potentiaalienergiaa**. Keinujan potentiaalienergia muuntuu liike-energiaksi heilahduksen aikana. Potentiaalienergian suuruus riippuu tutkittavan kappaleen massasta m ja putoamiskiihtyvyydestä g. Sen lisäksi potentiaalienergian suuruus riippuu kappaleen etäisyydestä h sovitusta **vertailutasosta** eli **0-tasosta**. Pöydällä olevan kirjan potentiaalienergia on nolla, jos vertailutasona on pöydän pinta. Jos vertailutasona on lattia, kirjalla on potentiaalienergia $E_p = mgh$, joka on sitä suurempi, mitä korkeampi pöytä on ja mitä suurempi kirjan massa on. Vastaavasti kirjan potentiaalienergia on negatiivinen $E_p = -mgh$, jos kirja on lattialla ja 0-tasona on pöydän pinta.

Potentiaalienergian vertailutaso sovitaan tilanteen mukaan. Kappaleen potentiaalienergia vertailutasolla on nolla. Usein on käytännöllistä valita potentiaalienergian nollatasoksi tarkasteltavan tapahtuman alin mahdollinen paikka.

Potentiaalienergian yksikkö joule (1 J) on massan, putoamiskiihtyvyyden ja matkan yksikköjen tulo.

$$[E_p] = [m] \cdot [g] \cdot [h] = 1\ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = 1\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} = 1\ \text{J}.$$

Potentiaalienergian muutos
Potentiaalienergian muutos on positiivinen, kun kappaletta nostetaan, ja negatiivinen, kun kappaletta lasketaan.

Potentiaalienergia muuttuu nostossa ja laskussa

Kun kappaletta nostetaan, sen potentiaalienergia kasvaa. Potentiaalienergian muutos nostossa ΔE_p saadaan vähentämällä potentiaalienergian loppuarvosta E_{pl} sen alkuarvo E_{pa}:

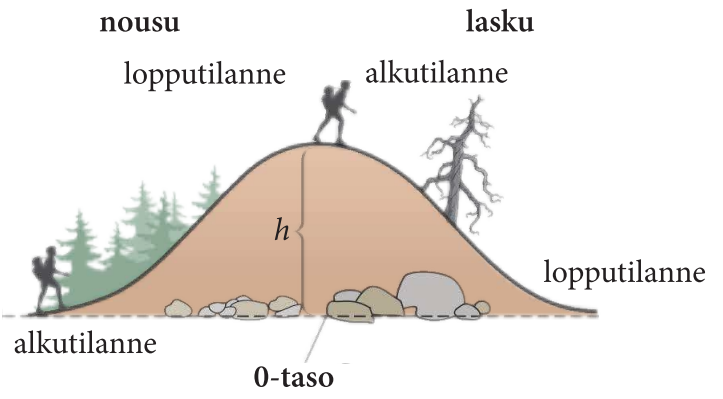
$$\Delta E_p = E_{pl} - E_{pa}.$$

Jos kappale lasketaan takaisin alkutilaansa, potentiaalienergian muutos on negatiivinen.

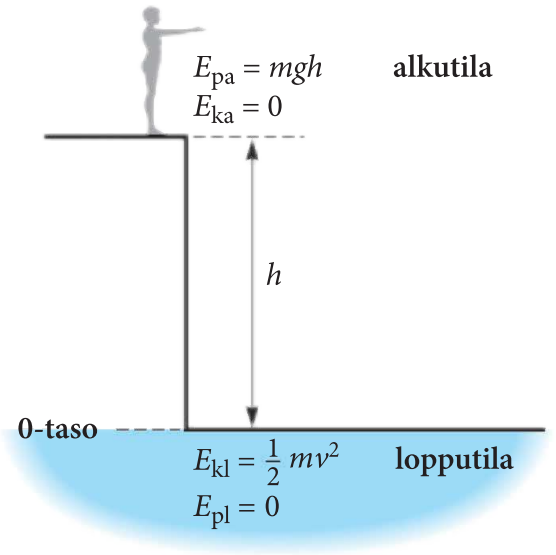
Tarkkaan ottaen potentiaalienergia on Maan ja kappaleen muodostaman systeemin potentiaalienergiaa, mutta usein käytetään yksinkertaisuuden vuoksi ilmaisua kappaleen potentiaalienergia. Potentiaalienergian lausekkeessa massa m liittyy kappaleeseen ja putoamiskiihtyvyys g Maahan.

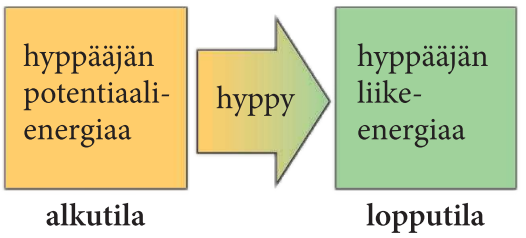
Mäelle nouseminen
$\Delta E_{p,nousu} = E_{pl} - E_{pa} = mgh - 0 = mgh$
$\Delta E_{p,nousu} > 0$

Mäeltä laskeutuminen
$\Delta E_{p,lasku} = E_{pl} - E_{pa} = 0 - mgh = -mgh$
$\Delta E_{p,lasku} < 0$



Mekaaninen energia
Kappaleen potentiaali- ja liike-energian summaa sanotaan kappaleen mekaaniseksi energiaksi.





Mekaaninen energia

Uimahyppääjä pudottautuu ilman alkunopeutta jalat edellä kohti allasta. Ilmanvastus ei hidasta merkittävästi putoamista. Tarkastellaan hypyn alku- ja lopputilaa ja valitaan potentiaalienergian nollatasoksi vedenpinta. Hyppääjällä on alkutilanteessa eli hyppytornissa ainoastaan potentiaalienergiaa, sillä hänen nopeutensa on nolla. Vastaavasti lopputilanteessa eli vedenpinnan tasolla hänellä on ainoastaan liike-energiaa, koska vedenpinta on valittu potentiaalienergian nollatasoksi eli vertailutasoksi.

Tarkastellaan hyppääjän potentiaalienergian ja liike-energian summaa eli **mekaanista energiaa** ensin hyppytornissa ja sitten vedenpinnan tasolla. Hyppytornissa liike-energia $E_{ka} = 0$, joten

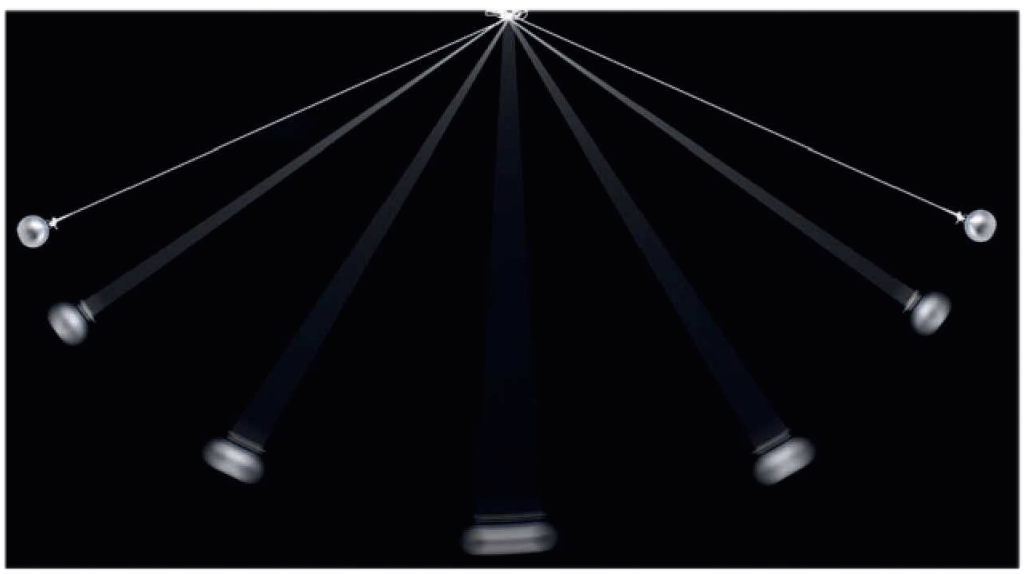
$$E_{ka} + E_{pa} = 0 + mgh = mgh.$$

Vedenpinnan tasossa potentiaalienergia $E_{pl} = 0$, joten

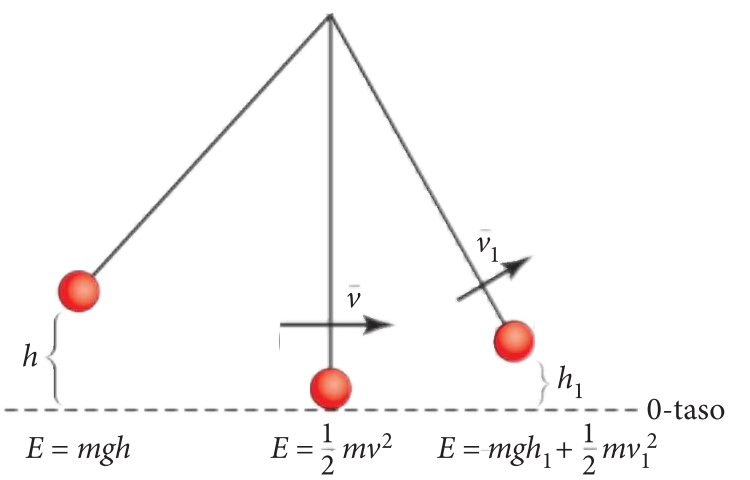
$$E_{kl} + E_{pl} = \frac{1}{2}mv^2 + 0 = \frac{1}{2}mv^2.$$

Kuvataan hyppyä oheisella energiakaaviolla. Koska ilmanvastus on merkityksettömän pieni, kaavion lohkot ovat samankorkuiset. Energia säilyy, eli lopputilassa energiaa on yhtä paljon kuin alkutilassa. Tämä tulos pätee yleisesti kaikille systeemeille, joihin ei siirry ja joista ei poistu energiaa.

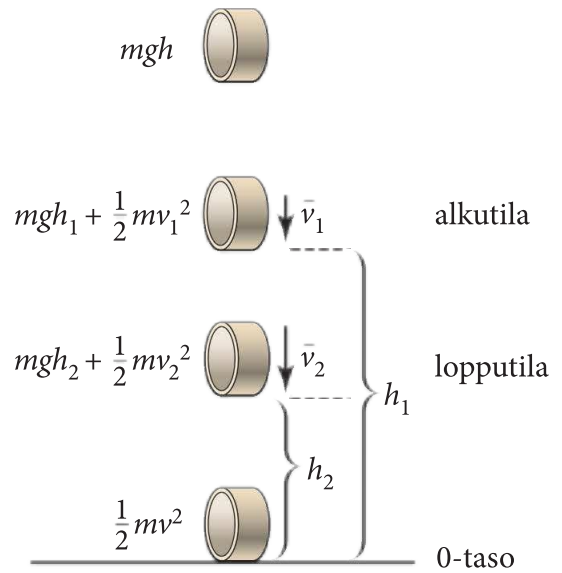
Samaa tapahtumaa voidaan kuvata eri tavoilla

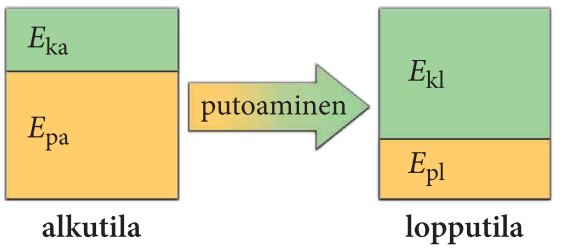


Stroboskooppivalokuva heilurista.



Heilurin mekaaninen energia heilahduksen eri vaiheissa.





$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

Energiakaavion lohkot ovat samankorkuiset, koska mekaaninen energia säilyy. Potentiaalienergiaa on muuntunut liike-energiaksi.

Mekaanisen energian säilymislaki

Putoavaan kappaleeseen vaikuttaa muitakin voimia kuin painovoima, mutta niiden vaikutus on usein merkityksettömän pieni. Kun esimerkiksi kivi putoaa kahden metrin korkeudelta, siihen vaikuttava **ilmanvastus** on niin pieni, että sitä ei tarvitse huomioida. Kivi ei esimerkiksi lämpene putoamisen aikana, joten sen mekaanista energiaa ei muunnu sisäenergiaksi. Mekaaninen energia säilyy, eli sen määrä alussa ja lopussa on sama.

Sijoittamalla mekaanisen energian säilymisen yhtälöön, $E_k + E_p =$ vakio, liike- ja potentiaalienergian lausekkeet saadaan yhtälö muotoon

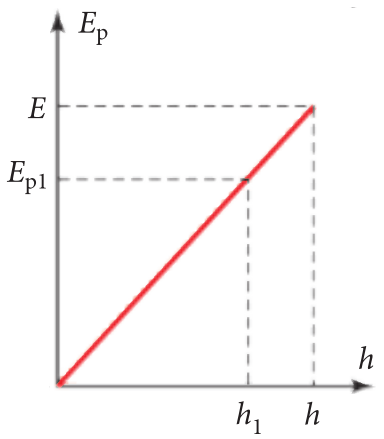
$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{ vakio.}$$

Mekaanisen energian säilymislaki on erittäin käyttökelpoinen työkalu, kun tutkitaan kappaleen liikettä. Liikeopin ongelman ratkaisemiseksi riittää, että tunnetaan systeemin alku- ja lopputila. Koska liike- ja potentiaalienergian summa on vakio, toisen täytyy pienentyä, kun toinen kasvaa. Kun liikkuvan kappaleen potentiaalienergia kasvaa, liike-energian täytyy vastaavasti pienentyä. Tällöin sanotaan, että kappaleen liike-energia muuntuu potentiaalienergiaksi.

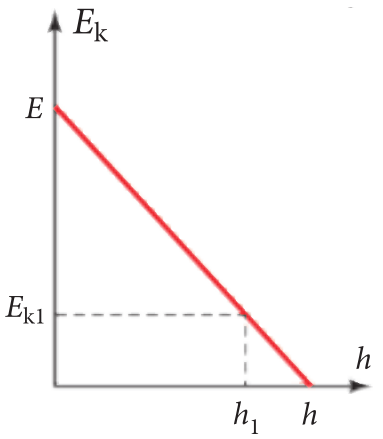
Koska kappaleella voi olla liike- ja potentiaalienergiaa sekä alku- että lopputilassa, mekaanisen energian säilymislakia käytetään usein muodossa

$$E_{ka} + E_{pa} = E_{kl} + E_{pl}.$$

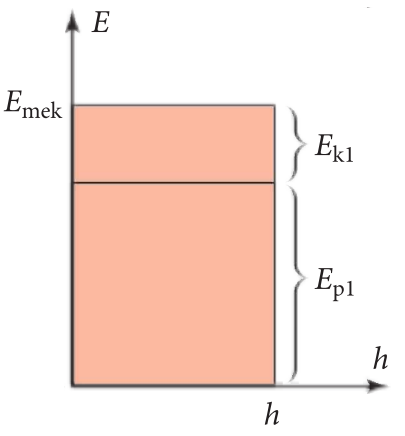
Mekaanisen energian säilymislaki
Mekaaninen energia säilyy, jos kappaleeseen ei vaikuta voimia, jotka muuntavat mekaanista energiaa lämpöenergiaksi.
$E_k + E_p$ = vakio



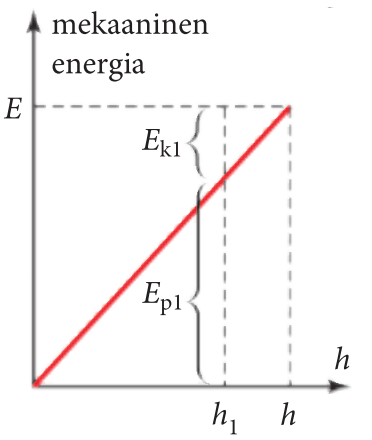
Heilurin potentiaalienergia.



Heilurin liike-energia.



Heilurin mekaaninen energia korkeudella h_1.



Heilurin mekaaninen energia.

Esimerkki 1 — Nopeuden vaikutus liike-energiaan

Kelkkailijoiden ja kelkan yhteinen massa on 135 kg. Kuinka suuri yhdistelmän liike-energia on, jos sen nopeus on

a) **0 m/s**

b) **10,0 m/s**

c) **20,0 m/s?**

Yksikkötarkastelu: $\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} = \text{J}$.

Huomaa!

Kun nopeus kaksinkertaistuu, niin liike-energia nelinkertaistuu.

Ratkaisu

Yhdistelmän liike-energia on verrannollinen kelkan ja kelkkailijan yhteiseen massaan ja nopeuden neliöön: $E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2$.

a) $m = 135\ \text{kg}$, $v = 0\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $E_\text{k} = ?$

Sijoitetaan liike-energian yhtälöön muuttujien arvot:

$$E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2$$
$$= \frac{1}{2} \cdot 135\ \text{kg} \cdot (0\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 0\ \text{J}.$$

b) $m = 135\ \text{kg}$, $v = 10{,}0\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $E_\text{k} = ?$

Sijoitetaan liike-energian yhtälöön:

$$E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2$$
$$= \frac{1}{2} \cdot 135\ \text{kg} \cdot (10{,}0\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 6750\ \text{J} \approx 6{,}75\ \text{kJ}.$$

c) $m = 135\ \text{kg}$ ja $v = 20{,}0\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $E_\text{k} = ?$

Sijoitetaan liike-energian yhtälöön:

$$E_\text{k} = \frac{1}{2}mv^2$$
$$= \frac{1}{2} \cdot 135\ \text{kg} \cdot (20{,}0\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 27000\ \text{J} \approx 27{,}0\ \text{kJ}.$$

Vastaus

Yhdistelmän liike-energia on

a) 0 J

b) 6,75 kJ

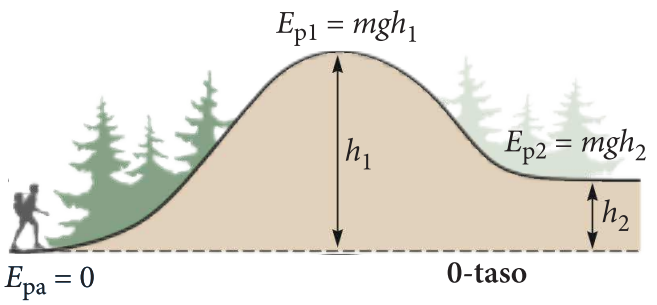
c) 27,0 kJ.

Esimerkki 2 — Potentiaalienergian muutos

Kuntoilijan massa on 76 kg. Miten hänen potentiaalienergiansa muuttuu, kun hän

a) nousee 25 m korkealle mäelle

b) laskeutuu mäen harjaa 15 m alempana olevalle levähdyspaikalle?



Ratkaisu

a) $m = 76\ \text{kg}$, $h_1 = 25\ \text{m}$, $\Delta E_p = ?$

Mäelle nouseminen kasvattaa kuntoilijan potentiaalienergiaa. Valitaan potentiaalienergian nollatasoksi lähtötaso. Kuntoilijan potentiaalienergia mäen laella on $E_{p1} = mgh_1$ ja potentiaalienergian muutos on

$$\Delta E_p = E_{p1} - E_{pa} = mgh_1 - 0 = mgh_1.$$

Sijoitetaan yhtälöön muuttujien arvot:

$$\begin{aligned}\Delta E_p &= mgh_1 \\ &= 76\ \text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 25\ \text{m} \\ &= 18\,639\ \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} \approx 19\ \text{kJ}.\end{aligned}$$

b) $h_2 = 10\ \text{m}$, $\Delta E_p = ?$

Kuntoilija laskeutuu mäen laelta, ja potentiaalienergian muutos

$$\Delta E_p = E_{p2} - E_{p1} = mgh_2 - mgh_1.$$

Sijoitetaan yhtälöön muuttujien arvot:

$$\begin{aligned}\Delta E_p &= mgh_2 - mgh_1 \\ &= 76\ \text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10\ \text{m} - 76\ \text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 25\ \text{m} \\ &= -11\,183{,}4\ \text{J} \approx -11\ \text{kJ}.\end{aligned}$$

Vastaus

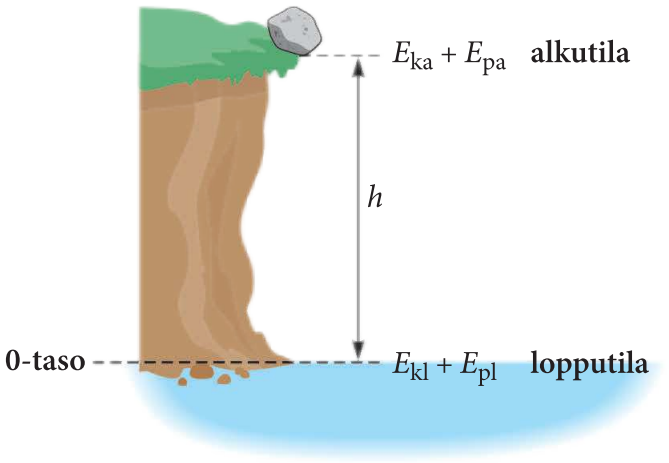
a) Kuntoilijan potentiaalienergia kasvaa 19 kJ.

b) Kuntoilijan potentiaalienergia pienenee 11 kJ.

Esimerkki 3 — Mekaaninen energia säilyy

a) Kivi, jonka massa on 5,7 kg, pudotetaan jyrkänteeltä järveen. Järven pinta on 3,3 metriä jyrkänteen reunan alapuolella. Kuinka suuri on kiven liike-energia, kun se osuu vedenpintaan?

b) Mikä on kiven nopeus, kun se osuu vedenpintaan?



Nopeuden ratkaiseminen

$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad | : m$

$\frac{1}{2}v^2 = gh \quad | \cdot 2$

$v^2 = 2gh \quad | \sqrt{\ }$

$v = \sqrt{2gh}$

Yksikkötarkastelu

$\sqrt{\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Ratkaisu

a) $m = 5{,}7$ kg, $h = 3{,}3$ m, $E_{kl} = ?$

Ilmanvastus on niin pieni, että sitä ei tarvitse huomioida. Tehtävän ratkaisussa sovelletaan mekaanisen energian säilymislakia muodossa $E_{ka} + E_{pa} = E_{kl} + E_{pl}$. Mekaaninen energia alussa on yhtä suuri kuin mekaaninen energia lopussa. Valitaan potentiaalienergian nollatasoksi vedenpinnan taso.

Kiven liike-energia on aluksi nolla, sillä sen nopeus $v = 0$ m/s.

Kiven potentiaalienergia on aluksi $E_{pa} = mgh$. Kiven potentiaalienergia on lopuksi nolla sen osuessa veteen. Kivellä on siis vain liike-energiaa, kun se osuu veteen. Mekaanisen energian säilymislaki

$E_{ka} + E_{pa} = E_{kl} + E_{pl}$ saadaan muotoon $0 + mgh = E_{kl} + 0$.

Kun kivi osuu veteen, sen liike-energia E_{kl} on siis yhtä suuri kuin sen potentiaalienergia jyrkänteen päällä:

$$E_{kl} = mgh$$

$$= 5{,}7 \text{ kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3{,}3 \text{ m} = 184{,}5\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^2} \approx 180 \text{ J}.$$

b) $v = ?$

a-kohdan mukaisesti $E_{kl} = E_{pa}$ eli $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$.

Ratkaistaan yhtälöstä v^2, jolloin saadaan $v^2 = 2gh$, josta saadaan $v = \sqrt{2gh}$.

Sijoitetaan yhtälöön $g = 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ja $h = 3{,}3$ m:

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3{,}3 \text{ m}} = 8{,}046\frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 8{,}0\frac{\text{m}}{s}.$$

Vastaus

a) Kiven liike-energia on 180 J.

b) Kiven nopeus on 8,0 m/s.

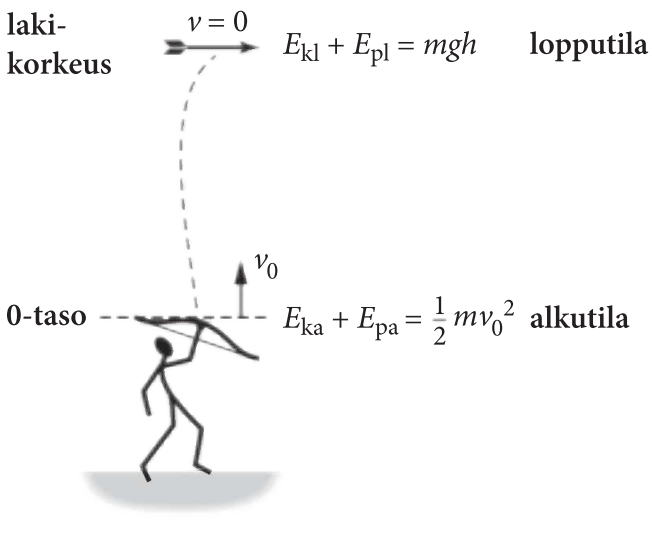
Esimerkki 4 — Mekaaninen energia säilyy

Nuolen lähtönopeus jousesta on 21 m/s.

a) Piirrä energiakaavio, jossa alkutila on nuolen irtoaminen jousesta ja lopputila nuolen lakikorkeus.

b) Kuinka korkealle lähtökohdastaan suoraan ylöspäin ammuttu nuoli nousee, jos ilmanvastus on merkityksettömän pieni?

c) Mikä nuolen nopeus on puolivälissä matkalla lakikorkeuteen?

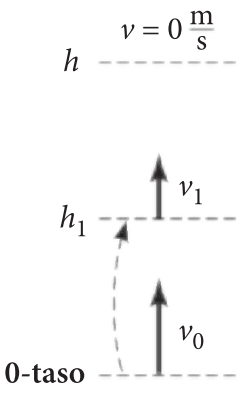


Korkeuden ratkaiseminen

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = 0 + mgh \quad | : m$$

$$\frac{1}{2}v_0^2 = gh \quad | : g$$

$$h = \frac{v_0^2}{2g}$$

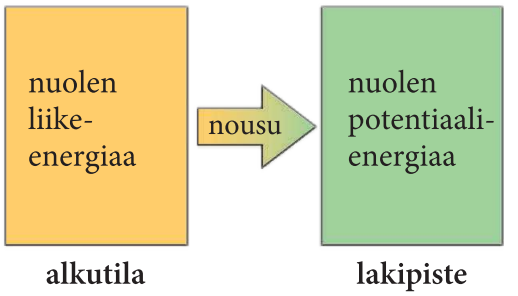


Huomaa!

Mekaanisen energian säilymisen avulla on kätevä ratkaista ongelmia, joihin liittyy nopeuden ja korkeuden selvittäminen.

Ratkaisu

a) Valitaan potentiaalienergian nollatasoksi taso, jolta nuoli ammutaan. Koska ilmanvastus on merkityksettömän pieni, mekaaninen energia säilyy. Energiakaavio kuvaa mekaanisen energian säilymistä.



b) $v_0 = 21$ m/s, $h = ?$

Alussa nuolella on vain liike-energiaa ja lopussa, lentoradan korkeimmassa kohdassa hetkellisesti vain potentiaalienergiaa.

$$E_{ka} + E_{pa} = E_{kl} + E_{pl} \quad \text{eli} \quad \frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = 0 + mgh,$$

josta ratkaistaan nousukorkeus h:

$h = \frac{v_0^2}{2g}$. Sijoitetaan yhtälöön $v_0 = 21\frac{m}{s}$ ja $g = 9{,}81\frac{m}{s^2}$:

$$h = \frac{\left(21\frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9{,}81\frac{m}{s^2}} = 22{,}477\ \text{m} \approx 22\ \text{m}.$$

c) $v_1 = ?$

Nyt lopputilanteessa nuoli on nousun puolivälissä. Nuolen nousemisesta voidaan tehdä energiakaavio. Mekaanisen energian säilymisen takia puolessa välissä nuolen potentiaalienergia on yhtä suuri kuin sen liike-energia.

$$E_{ka} + E_{pa} = E_{kl} + E_{pl}$$

$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1$, jossa $v_0 = 21\frac{m}{s}$ ja $h_1 = \frac{h}{2} = 11{,}239$ m.

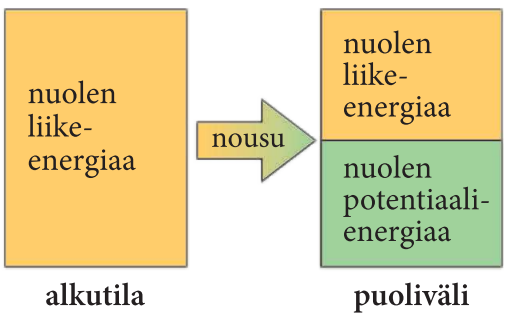
Ratkaistaan v_1:

$$\frac{1}{2}v_1^2 = \frac{1}{2}v_0^2 - gh_1$$

$$v_1^2 = v_0^2 - 2gh$$

$$v_1 = \sqrt{v_0^2 - 2gh}$$

$$= \sqrt{(21\frac{m}{s})^2 - 2 \cdot 9{,}81\frac{m}{s^2} \cdot 11{,}2\ \text{m}} \approx 14{,}8\frac{m}{s}.$$



Vastaus

a) Nuoli nousee 22 metrin korkeudelle.

b) Nuolen nopeus puolivälissä on 15 m/s.

Tiivistelmä

- Systeemin energia muuntuu muodosta toiseen.
- Potentiaalienergia riippuu paikasta.
- Potentiaalienergia muuttuu nostossa ja laskussa.
- Liikkuvalla kappaleella on liike-energiaa.
- Mekaaninen energia on kappaleen liike- ja potentiaalienergioiden summa.
- Mekaaninen energia säilyy jos kappaleeseen ei vaikuta voimia, jotka muuntavat mekaanista energiaa lämpöenergiaksi.

Perustehtävät

17. Selosta lyhyesti, mitä tarkoittaa kappaleen
a) potentiaalienergia
b) liike-energia
c) mekaaninen energia.

18. Vastaa ja perustele vastauksesi.
a) Voiko kappaleen potentiaalienergia olla negatiivinen?
b) Voiko kappaleen liike-energia olla negatiivinen?

19. **a)** Selosta lyhyesti, mitä tarkoittaa jonkin systeemin mekaanisen energian säilyminen.
b) Kerro esimerkki mekaanisen energian säilymisestä.
c) Millaisessa tapauksessa mekaaninen energia ei säily?

20. Mehiläisen massa on 1,2 grammaa. Kuinka suuri liike-energia mehiläisellä on, kun sen nopeus on 2,1 m/s? Esim. 1

21. Uimahyppääjän massa on 78 kg. Hän hyppää veteen hyppytornista. Hyppääjä on 5,2 metriä veden pinnan yläpuolella.
a) Laske hyppääjän potentiaalienergia ennen hyppyä, kun potentiaalienergian vertailutaso on vedenpinta.
b) Kuinka suuri hyppääjän potentiaalienergia on vedenpinnan tasolla?
c) Kuinka paljon hyppääjän potentiaalienergia muuttuu hypyssä? Esim. 3 ja 4

22. Keinujan potentiaalienergia muuttuu heilahduksen korkeuden funktiona oheisen taulukon mukaisesti.
a) Havainnollista tuloksia koordinaatistossa, jossa vaaka-akselilla on korkeus ja pystyakselilla potentiaalienergia.

Korkeus (m)	Potentiaalienergia (J)
0	0
0,20	41,2
0,40	82,4
0,80	165

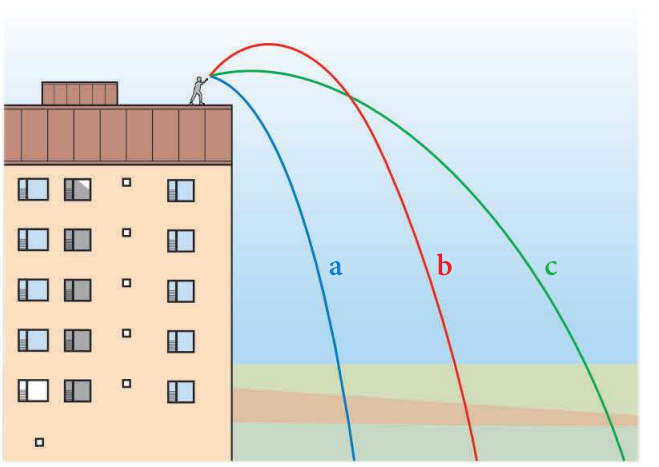
b) Kuinka suuri potentiaalienergia on, kun $h = 0{,}50$ m?
c) Millä korkeudella potentiaalienergia on 65 J? Esim. 3

23. Alla olevassa taulukossa on potentiaalienergian ja liike-energian arvoja kolmen tapahtuman A, B ja C alku- ja lopputilanteessa.

	Alkutilanne		Lopputilanne	
	E_k (J)	E_p (J)	E_k (J)	E_p (J)
A	0	25	10	15
B	10	5	5	15
C	15	0	0	15

a) Missä tapauksissa mekaaninen energia säilyy?
b) Mitä mittaukset voisivat esittää?

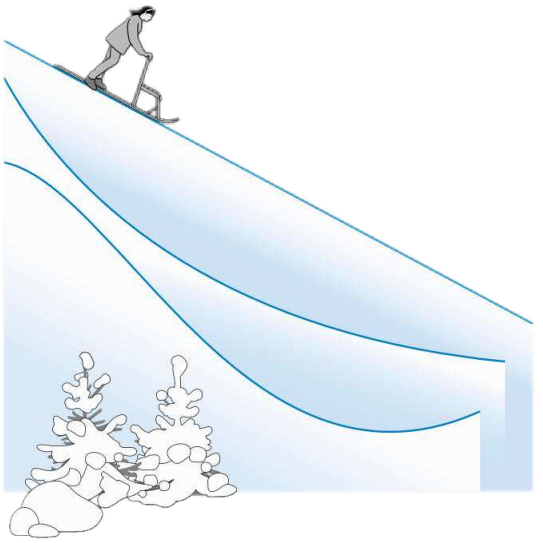
24. Talon katolta heitetään kolme kiveä. Kivillä on sama alkunopeus, mutta niiden heittosuunnat ovat kuvan mukaisesti erilaiset.
a) Piirrä tilannetta kuvaavat energiakaaviot, kun alkutila on hetki ennen kiven irtoamista kädestä ja lopputila juuri ennen kiven osumista maahan. Kivi irtoaa kädestä samalla korkeudella kaikissa heitoissa.
b) Vertaa kivien nopeuksia niiden osuessa maahan. Esim. 3 ja 4



Soveltavat tehtävät

25. Laadi energiakaavio, joka kuvaa suoraan ylös heitetyn kiven energiaa heittohetkestä nousukorkeuden puoliväliin.

26. Kelkkailija liukuu alas erittäin liukasta jäämäkeä. Kuvassa on kolme yhtä korkeaa ja yhtä pitkää mäkeä.



Missä mäessä kelkkailija saa suurimman nopeuden?

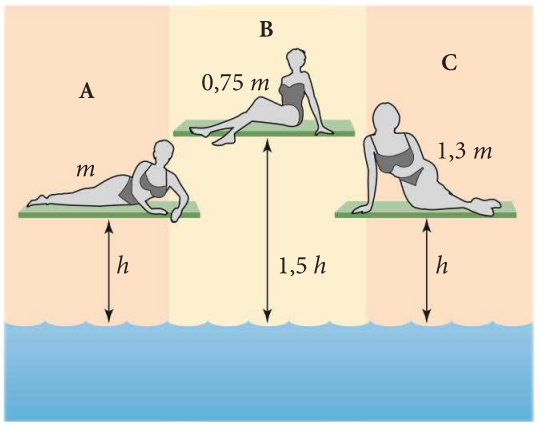
27. Miten auton liike-energia muuttuu, kun sen nopeus
a) kaksinkertaistuu
b) nelinkertaistuu
c) pienenee puoleen alkuperäisestä?

28. Vesipisara irtoaa ilman alkunopeutta 2,0 m lattian yläpuolella olevasta vuotavasta suihkusta. Millä nopeudella pisara osuu lattiaan?

29. Kivi heitetään alkunopeudella 11,5 m/s suoraan
a) alaspäin
b) ylöspäin.
Kuinka suuri sen nopeus on 3,2 m lähtötasoa alempana?

30. Nuoli ammutaan suoraan ylöspäin, ja se nousee 25 m lähtötason yläpuolelle. Nuolen massa on 220 g. Mikä oli nuolen lähtönopeus?

31. Linnanmäen huvipuistossa oli aikanaan ”merenneitoja”, joita pudotettiin altaaseen tarkoilla heitoilla.



a) Vertaa merenneitojen potentiaalienergioita, kun potentiaalienergian nollataso on vedenpinta.
b) Kenellä merenneidoista on suurin liike-energia, kun hän pulahtaa veteen?

32. Keinujan potentiaalienergia muuttuu heilahduksen korkeuden funktiona oheisen taulukon mukaisesti.

Korkeus (m)	Potentiaalienergia (J)
0	0
0,20	41,2
0,40	82,4
0,80	165

a) Havainnollista tuloksia graafisesti.
b) Kuinka suuri on keinujan massa?

33. Linnun nopeus muuttuu syöksyssä oheisen taulukon mukaisesti. Linnun massa on 0,45 kg.

Aika (s)	Nopeus (m/s)
0	21
1,0	25
2,0	30
3,0	34
4,0	39
5,0	45
6,0	51

a) Piirrä kuvaaja, joka esittää linnun nopeutta ajan funktiona.
b) Piirrä kuvaaja, joka esittää linnun liike-energiaa ajan funktiona.
c) Miten piirtämäsi kuvaajat poikkeavat toisistaan?

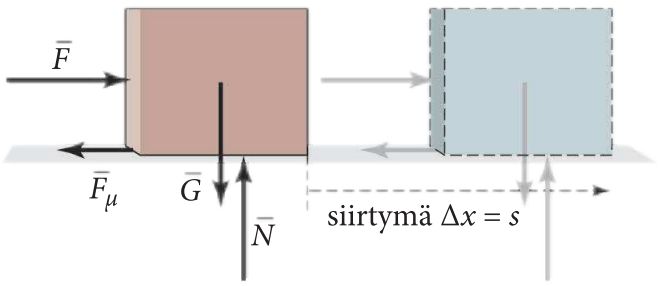
3 Työ muuntaa mekaanista energiaa

Luistelijan mekaaninen energia kasvaa, kun hän kiihdyttää nopeuttaan.

Voima tekee työtä

Luistelijan liike kiihtyy lähdössä. Hänen liike-energiansa ja siten myös mekaaninen energiansa kasvaa, kun nopeus kasvaa. Kappaleen mekaanisen energian muutoksen selvittämiseksi tarvitaan voiman tekemän **työn** käsitettä.

Tässä luvussa tarkastellaan tilanteita, joissa kappaleeseen vaikuttava voima on kappaleen liikkeen suunnan kanssa yhdensuuntainen tai kohtisuorassa sitä vastaan. Kun liikkuvaan kappaleeseen vaikuttaa voima, joka ei ole kohtisuorassa liikesuuntaa vastaan, voima tekee työtä.



Jos kappale liikkuu suoraviivaisesti yhteen suuntaan, sen kulkema matka *s* on sama kuin sen siirtymä Δx. Silloin työ voidaan esittää muodossa $W = Fs$. Koska $\overline{F}$ on suurempi kuin F_μ, kappale on kiihtyvässä liikkeessä oikealle.

Vakiovoiman tekemä työ
$W = Fs$,
jossa
F on kappaleeseen vaikuttava voima ja
s on siirtymä voiman vaikutussuunnassa.

Työ on energian siirtoa voimien välityksellä

Kun lattialla olevaa laatikkoa siirretään, laatikkoon vaikuttavat paino $\overline{G}$, kitka $\overline{F}_\mu$, pinnan tukivoima $\overline{N}$ ja työnnöstä aiheutuva kosketusvoima $\overline{F}$.

Tarkastellaan seuraavaksi työnnöstä aiheutuvan kosketusvoiman $\overline{F}$ tekemää työtä. Kokemuksesta tiedetään, että laatikon siirtäminen lattialla on sitä työläämpää, mitä suurempi voima laatikon työntämiseen tarvitaan ja mitä pitempi matka sitä työnnetään. Fysiikassa vakiovoiman tekemä työ määritellään kappaleeseen vaikuttavan voiman $\overline{F}$ ja voiman vaikutussuuntaisen siirtymän $\Delta x = s$ tulona eli $W = Fs$. Työ on siten sitä suurempi, mitä suurempia työtä tekevä voima ja siirtymä ovat.

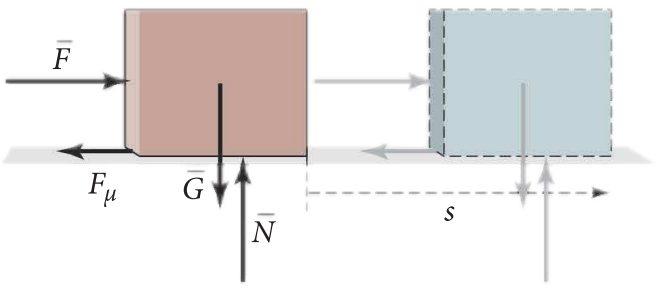
Työn yksikkö on sama kuin energian yksikkö eli

$$[W] = [F] \cdot [s] = 1\ \mathrm{N} \cdot 1\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{Nm} = 1\ \mathrm{J} \left(= 1\ \frac{\mathrm{kgm}^2}{\mathrm{s}^2} \right).$$

Työn merkkisäännöt

Voiman tekemä työ on

- positiivinen, jos liikkeen suunta ja voima ovat samansuuntaiset
  $W = Fs$
- negatiivinen, jos liikkeen suunta ja voima ovat vastakkaissuuntaiset
  $W = -Fs$
- nolla, jos liikkeen suunta ja voima ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan
  $W = 0$.



Voima $\overline{F}$ tekee positiivisen työn ja kitkavoima F_μ negatiivisen työn.

Työ voi olla positiivista tai negatiivista

Työ voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. Edellä tarkasteltuun laatikkoon vaikuttavan voiman $\overline{F}$ tekemä työ on positiivinen $W = Fs$, sillä liikkeen suunta ja voima ovat samansuuntaiset.

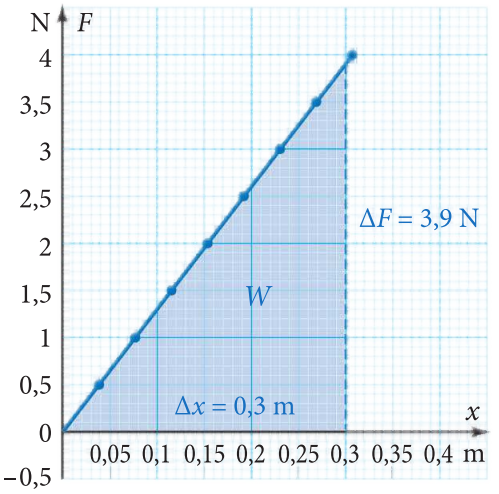
Kappaleen liikkuessa kitkavoiman $\overline{F}_\mu$ tekemä työ on negatiivinen $W = -F_\mu s$, sillä liikkeen suunta ja kitkavoima ovat vastakkaissuuntaiset.

Laatikkoon vaikuttavan voiman $\overline{F}$ tekemä työ siirtää lihasten kemiallista energiaa laatikon mekaaniseksi energiaksi. Kitkavoiman tekemä työ siirtää vastaavasti kappaleen mekaanista energiaa laatikon ja lattian rakenneosien sisäenergiaksi. Tämä havaitaan toisiaan vasten hankaavien pintojen lämpötilan kasvusta.

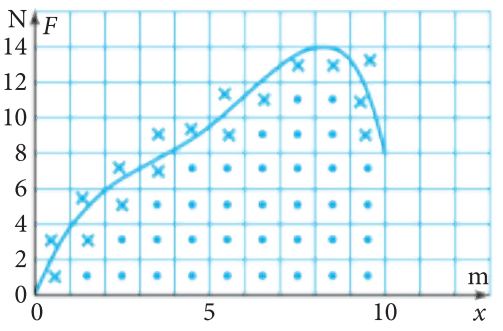
Kun kappaletta siirretään pitkin vaakasuoraa tasoa, pinnan tukivoima $\overline{N}$ ja paino $\overline{G}$ eivät tee työtä, sillä ne ovat kohtisuorassa siirtymää vastaan.

Voiman $\overline{F}$ tekemä työ kasvattaa laatikon nopeutta, jos $\overline{F}$ on suurempi kuin kitka $\overline{F}_\mu$. Sellaisessa erikoistapauksessa, jossa nämä voimat ovat yhtä suuret, laatikon nopeus ei muutu.

Vaikka työn määritelmä vastaa tietyiltä osin arkikielen työksi miellettyä tekemistä, siitä on myös poikkeuksia. Esimerkiksi ajattelu ei ole fysiikan näkökulmasta työtä, sillä siihen ei liity voimaa eikä siirtymää.



Voiman tekemä työ on kuviossa olevan kolmion fysikaalinen pinta-ala.

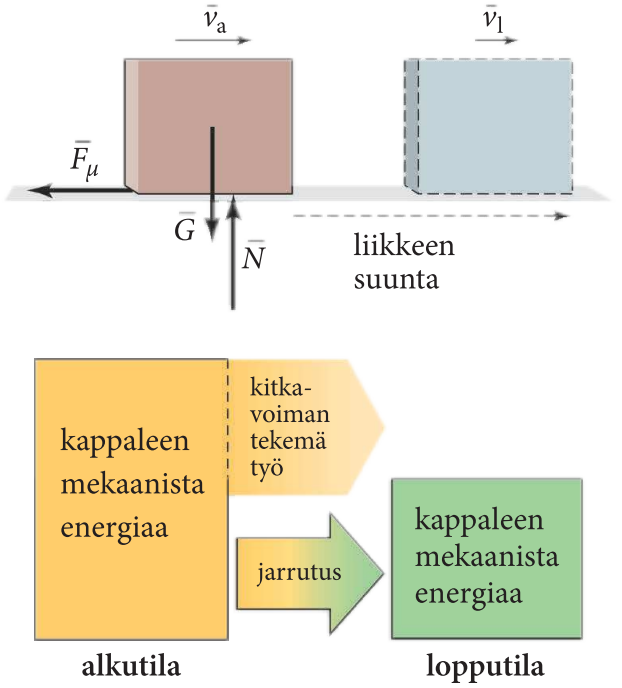


Muuttuvan voiman tekemä työ lasketaan käyrän ja paikka-akselin väliin jäävien ruutujen fysikaalisten pinta-alojen avulla.

Muuttuvan voiman tekemä työ määritetään fysikaalisena pinta-alana

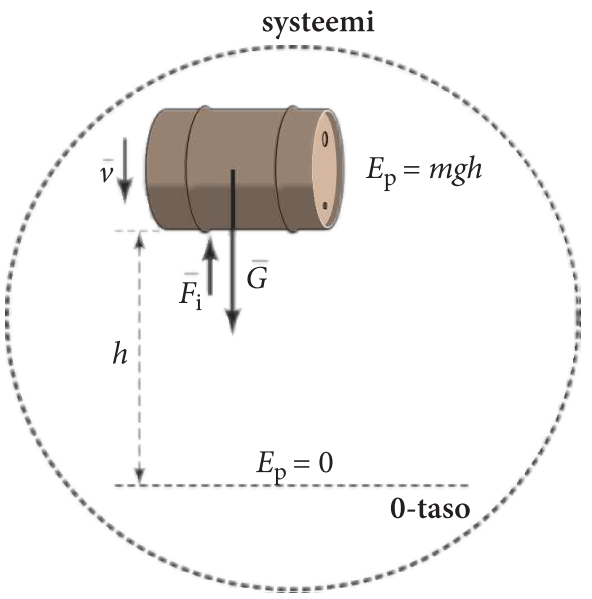
Useimmissa tapauksissa työtä tekevä voima ei pysy vakiona. Voiman tekemä työ voidaan laskea helposti, jos voima muuttuu tasaisesti matkan funktiona. Kun jousta venytetään, venyttämiseen tarvittava voima kasvaa samassa suhteessa venytyksen kanssa. Mitä enemmän jousta venytetään, sitä suurempi voima venyttämiseen tarvitaan. Voima on siten suoraan verrannollinen venymään, eli sen kuvaaja on origon kautta kulkeva suora. Monet luonnossa esiintyvät voimat ovat jousta venyttävän voiman kaltaisia. Tällaisen voiman tekemä työ määritetään x, F -koordinaatistossa kuvaajan muodostaman kolmion fysikaalisen pinta-alan avulla. Menetelmää, jossa suureen arvo lasketaan fysikaalisen pinta-alan avulla, kutsutaan **graafiseksi integroinniksi**.

Useimmissa tapauksissa työtä tekevä voima ei muutu säännöllisesti. Tällaisessa tapauksessa lasketaan käyrän ja paikka-akselin väliin jäävä pinta-ala ruutujen avulla.



Kitkavoiman tekemä työ pienentää kappaleen mekaanista energiaa.

Mekaniikan energiaperiaate
Mekaanisen energian muutos on yhtä suuri kuin kappaleeseen vaikuttavien muiden voimien kuin painovoiman tekemä työ.
$E_l - E_a = W$, eli $\Delta E = W$, jossa E_a on kappaleen mekaaninen energia alkutilassa, E_l on mekaaninen energia lopputilassa ja W on kappaleeseen vaikuttavien muiden kuin painovoiman tekemä työ.



Kun käytetään mekaniikan energiaperiaatetta, systeemi on Maa ja kappale.

Voiman tekemä työ vaikuttaa mekaaniseen energiaan

Pöydälle liukumaan heitetty kirja pysähtyy kitkavoiman tekemän työn ansiosta. Kitkavoiman tekemä työ on tässä tapauksessa negatiivista. Kirjan mekaaninen energia muuntuu kirjan ja pöydän sisäenergiaksi. Tämä havaitaan molempien pintojen lämpenemisenä.

Luonnonilmiöt ovat yleensä sellaisia, että kappaleiden mekaaninen energia muuttuu niissä merkittävästi. Jokin kappaleen ulkopuolinen voima tekee työtä ja lisää kappaleen mekaanista energiaa tai vähentää sitä. Heilurin liike jatkuu pitkään lähes vaimenemattomana, mutta lopulta ilmanvastus pysäyttää heilurinkin. Mekaaninen energia muuntuu tässäkin tapauksessa heilurin ja sen ympäristön sisäenergiaksi.

Kappaleeseen vaikuttaa yleensä useita voimia, kuten paino, pinnan tukivoima ja erilaiset liikettä vastustavat sekä ylläpitävät voimat. Kappaleen mekaaninen energia osataan ennustaa tietyn prosessin jälkeen, jos tunnetaan kaikki kappaleeseen vaikuttavat voimat ja alkutilan mekaaninen energia, joka on kineettisen energian ja potentiaalienergian summa. Mekaanisen energian muutos voidaan laskea **mekaniikan energiaperiaatteen** avulla. Sen mukaan kappaleen mekaaninen energia voi kasvaa tai vähetä, kun kappaleeseen vaikuttavat voimat, lukuun ottamatta painovoimaa, tekevät työtä.

Mekaniikan energiaperiaate putoamisliikkeessä

Mekaaninen energia on potentiaalienergian ja liike-energian summa. Tarkastellaan systeemiä, jonka muodostavat putoamassa oleva tynnyri ja Maa. Potentiaalienergia on Maan ja tynnyrin muodostaman systeemin potentiaalienergiaa. Systeemin liike-energia on vastaavasti putoavan tynnyrin liike-energiaa.

Tynnyriin vaikuttavat painovoima $\bar{G}$ ja ilmanvastus F_i.

Mekaniikan energiaperiaatteen mukaan mekaanisen energian muutos on yhtä suuri kuin muiden voimien kuin painovoiman tekemä työ, $E_l - E_a = W$. Sijoitetaan mekaniikan energiaperiaatteen lausekkeeseen mekaaninen energia lopussa ja mekaaninen energia alussa, jolloin saadaan

$\frac{1}{2}mv^2 - mgh = W_i$, jossa W_i on ilmanvastuksen tekemä työ.

Systeemin mekaaninen energia muuttuu ilmanvastuksen tekemän työn määrän verran.

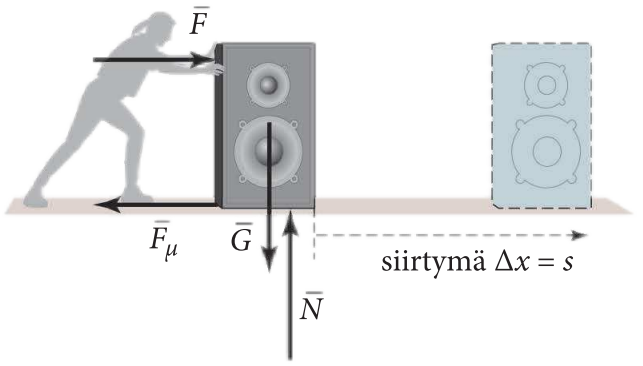
Esimerkki 1 — Voiman tekemä työ

Basisti työntää vaakasuoraan tasaisella lattialla kaiutinkaappia, jonka massa on 45 kg. Kaappiin vaikuttaa 120 N:n suuruinen kitkavoima. Kaappia työnnetään niin, että kaappi liikkuu tasaisella nopeudella 3,4 metriä. Kuinka suuren työn

a) kaiutinkaappiin vaikuttava käden ja kaapin välinen kosketusvoima tekee?

b) kaappiin vaikuttava kitkavoima tekee?

c) Mitä energianmuutoksia työnnön aikana tapahtuu?



Huomaa!

Paino ja pinnan tukivoima eivät tee työtä, sillä ne ovat kohtisuorassa siirtymää vastaan.

Ratkaisu

$m = 45$ kg, $F_\mu = 120$ N, $s = 3,4$ m.

Tutkittavana systeeminä on kaiutinkaapisto. Kaapistoon vaikuttavat sen paino $\overline{G}$, kitkavoima F_μ, pinnan tukivoima $\overline{N}$ ja työntävä kosketusvoima $\overline{F}$.

a) $W = ?$ Newtonin II lain mukaan $F_{kok} = ma$. Koska kaapisto liikkuu tasaisesti, kiihtyvyys on $a = 0$ m/s^2 ja siksi $F_{kok} = 0$ N, eli kaappiin vaikuttavien voimien summa on 0 N. Työntävän kosketusvoiman suuruus on siten suuruudeltaan sama kuin kitkavoiman suuruus 120 N. Voiman ja liikkeen suunnat ovat samat, joten voiman tekemä työ on positiivinen. Sijoitetaan suureiden arvot $F = 120$ N ja $s = 3,4$ m.

$$W = Fs$$
$$= 120 \text{ N} \cdot 3,4 \text{ m} = 408 \text{ J} \approx 410 \text{ J}.$$

b) $W_\mu = ?$

Kitkavoiman suunta on liikkeen suunnalle vastakkainen, joten sen tekemä työ on negatiivinen.

$$W_\mu = -F_\mu s$$
$$= -120 \text{ N} \cdot 3,4 \text{ m} = -408 \text{ J} \approx -410 \text{ J}.$$

c) Basistin työntäessä kaiutinkaapistoa hänen lihastensa kemiallista energiaa muuntuu voimien tekemän työn välityksellä muiksi energiamuodoiksi. Käden kosketusvoima saa kaapiston liikkeelle ja pitää sen liikkeessä. Kosketusvoiman tekemä työ siirtää lihasten kemiallista energiaa kaapiston mekaaniseksi energiaksi. Kaapiston ja lattian välinen kitkavoima vastustaa liikettä ja muuttaa kaapiston mekaanista energiaa muiksi energiamuodoiksi, kuten pintojen rakenneosien lämpöenergiaksi. Tämä havaitaan pintojen lämpenemisenä ja äänenä.

Vastaus

a) Voiman tekemä työ on 410 J.

b) Kitkavoiman tekemä työ on –410 J.

Esimerkki 2 — Nostotyö

Lapsi kannattelee kissaa käsissään. Kissan massa on 3,5 kg. Kuinka suuren työn kissaa kannatteleva voima tekee, kun kissa

a) nostetaan 95 cm korkealle pöydälle
b) lasketaan pöydältä lattialle
c) kannetaan sylissä 3,5 metrin matka?
d) Miten kissan liike- ja potentiaalienergiat muuttuvat edellisissä kohdissa?

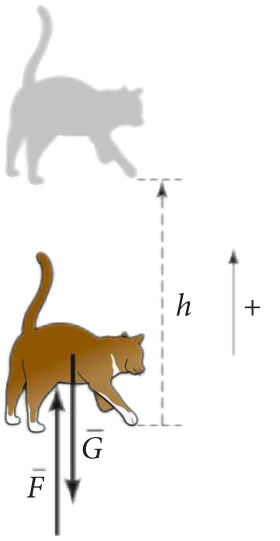
Huomaa!

Voiman $\overline{F}$ tekemä työ nostamisessa on suuruudeltaan sama kuin työ laskemisessa mutta vastakkaismerkkinen. Sen sijaan kissan kantamisessa kannatteleva voima ei tee työtä.

Ratkaisu

Tutkittavana systeeminä on kissa, jonka m = 3,5 kg. Tunnistetaan kissaan vaikuttavat voimat. Merkitään kissaa kannattelevaa voimaa $\overline{F}$:llä ja kissan painoa $\overline{G}$:llä. Kissaa kannatteleva voima $\overline{F}$ syntyy käden ja kissan kosketusvuorovaikutuksesta. Valitaan liikkeen suunta positiiviseksi.

a) $h = 0{,}95$ m, $m = 3{,}5$ kg, $g = 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $W = ?$



Kissaan vaikuttavan voiman tekemä työ on positiivinen, sillä voima $\overline{F}$ on liikkeen suuntainen. Oletetaan, että kissaa nostetaan tasaisesti. Tällöin Newtonin toisen lain mukaan $F_{\text{kok}} = 0$ N. Siten nostavan voiman suuruus on yhtä suuri kuin kissan paino $F = G = mg$.

Nostavan voiman tekemä työ

$W = Fh$.

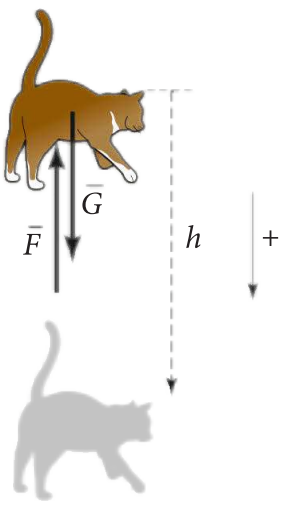
Sijoitetaan työn lausekkeeseen $F = mg$:

$W = mgh$.

Sijoittamalla tunnetut arvot saadaan

$$W = 3{,}5 \text{ kg} \cdot 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}95 \text{ m}$$
$$= 32{,}6 \text{ Nm}$$
$$\approx 33 \text{ J}.$$

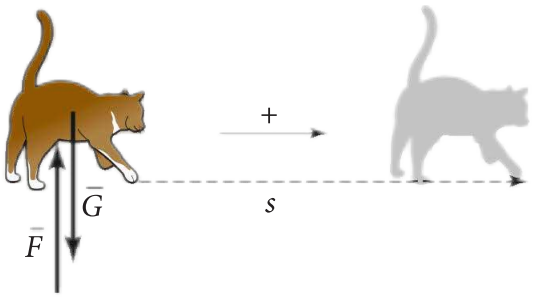
b) $m = 3{,}5$ kg, $h = 0{,}95$ m, $W = ?$



Kannattelevan voiman tekemä työ on negatiivinen, sillä nyt voiman $\overline{F}$ suunta on liikkeelle vastakkainen. Oletetaan, että kissa lasketaan lattialle tasaisesti. Tällöin saadaan voiman F tekemä työ W seuraavasti: $W = -Fs = -mgh$.

Sijoittamalla tunnetut arvot saadaan

$$W = -3{,}5 \text{ kg} \cdot 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}95 \text{ m}$$
$$= -32{,}6 \text{ Nm}$$
$$\approx -33 \text{ J}.$$



c) $W = ?$

Nyt voima ja siirtymä ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan ja voiman $\bar{F}$ tekemä työ $W = 0$.

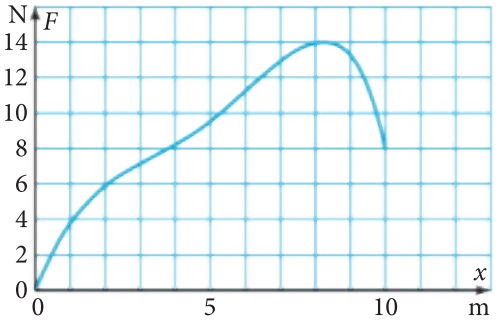
d) a-kohdassa kissan potentiaalienergia kasvaa. Kissa on paikallaan ennen nostoa ja noston jälkeen, joten sen liike-energia ei muutu. b-kohdassa kissan potentiaalienergia pienenee. Kissa on paikallaan ennen laskemista ja laskemisen jälkeen, joten sen liike-energia ei muutu. c-kohdassa kissan mekaaninen energia ei muutu.

Vastaus

a) Voima tekee 33 J:n suuruisen työn.
b) Voima tekee –33 J:n suuruisen työn.
c) Voima ei tee työtä.

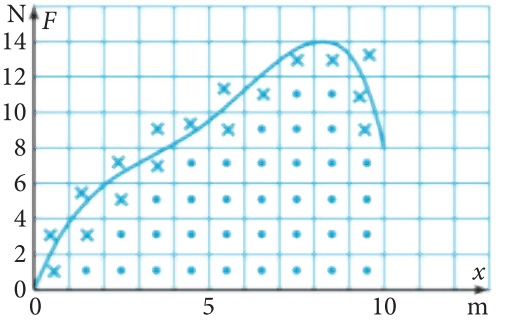
Esimerkki 3 — Epäsäännöllisesti muuttuvan voiman tekemä työ

Leikkiautoon vaikuttava kokonaisvoima muuttuu alla olevan kuvion mukaisesti matkan funktiona. Kuinka suuren työn kokonaisvoima tekee välillä 0…10 m?



Ratkaisu

Työtä tekevä kokonaisvoima ei muutu säännöllisesti, joten työ lasketaan käyrän ja paikka-akselin väliin jäävien ruutujen avulla fysikaalisena pinta-alana.



Kokonaisia ruutuja on 35 ja vajaita 18. Kuvion ruutujen lukumäärä n voidaan arvioida laskemalla yhteen kokonaisten ruutujen lukumäärä 35 ja vajaiden ruutujen lukumäärä 18 jaettuna kahdella:

$$n = 35 + \frac{18}{2} = 44.$$

Yhden ruudun fysikaalinen pinta-ala vastaa työtä

$W = 2{,}0\ \text{N} \cdot 1{,}0\ \text{m} = 2{,}0\ \text{J}.$

Kokonaisvoiman tekemä työ saadaan kertomalla ruutujen lukumäärällä yhden ruudun fysikaalista pinta-alaa vastaava työ.

$W_{\text{kok}} = nW = 44 \cdot 2{,}0\ \text{J} = 88\ \text{J}$

Vastaus

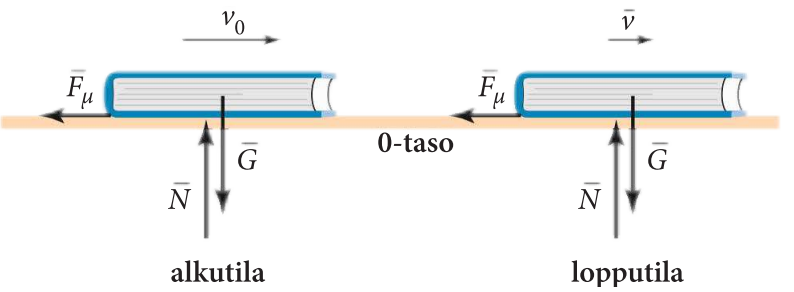
Kokonaisvoiman tekemä työ on 88 J.

Kirja heitetään liukumaan käytävää pitkin. Sen alkunopeus on 11 m/s ja massa 150 g. Kuinka suuri kitkavoima kirjaan vaikuttaa, kun sen nopeus hidastuu 3,5 metrin matkalla arvoon 8,3 m/s?

Ratkaisu

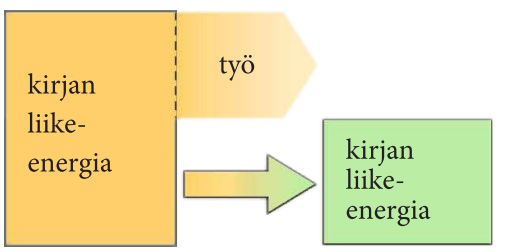
$v_0 = 11$ m/s, $m = 150$ g, $s = 3{,}5$ m, $v = 8{,}3$ m/s, $F_\mu = ?$

Tutkittavana systeeminä on kirja. Pinnan tukivoima $\bar{N}$ ja paino $\bar{G}$ eivät tee työtä, sillä ne ovat kohtisuorassa liikkeen suuntaa vastaan.



Mekaniikan energiaperiaatteen mukaan mekaanisen energian muutos on nyt yhtä suuri kuin kappaleeseen vaikuttavien vastusvoimien tekemä työ: $E_l - E_a = W$.

Kirjan potentiaalienergia ei muutu, joten sen mekaaninen energia on tässä tapauksessa pelkästään liike-energiaa. Tilannetta voidaan havainnollistaa energiakaaviolla.



Täten

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = W.$$

Työ on määritelmän mukaan $W = -F_\mu s$, sillä kitkavoima on liikkeen suunnalle vastakkainen.

Sijoitetaan W yllä olevaan yhtälöön $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -F_\mu s$ ja ratkaistaan voima F_μ.

$$F_\mu = -\frac{\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2}{s}$$

Sijoitetaan suureiden arvot yhtälöön, jolloin saadaan

$$F_\mu = \frac{-\frac{1}{2}\cdot 0{,}15\ \text{kg}\cdot(8{,}3\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + \frac{1}{2}\cdot 0{,}15\ \text{kg}\cdot(11\frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{3{,}5\ \text{m}}$$

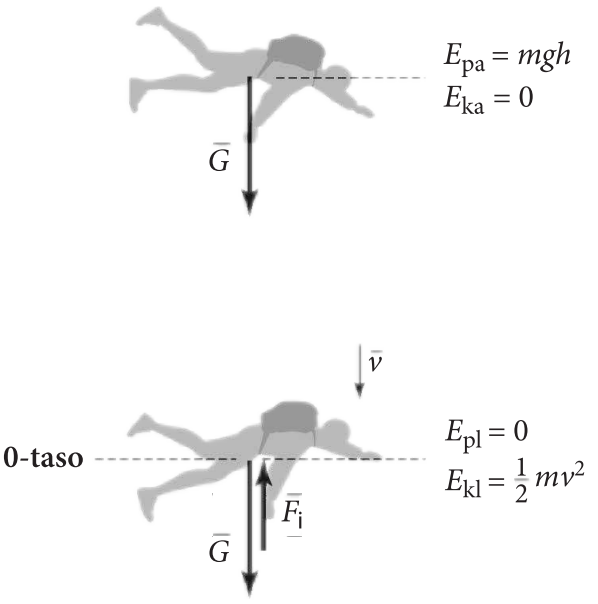
$$= 1{,}1166\ \frac{\text{kg}\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{\text{m}} \approx 1{,}1\ \text{N}.$$

Vastaus

Voiman suuruus on 1,1 N.

Esimerkki 5

Laskuvarjohyppääjä pudottautuu hyppyynsä paikallaan olevasta helikopterista. Hyppääjän nopeudeksi mitataan 110 metrin vapaan pudotuksen jälkeen 41 m/s. Kuinka suuren työn vastusvoimat ovat tehneet pudotuksessa? Hyppääjän massa varusteineen on 99 kg.



Huomaa!

Työ on negatiivinen, joten se pienentää hyppääjän mekaanista energiaa. Vastusvoimat ovat siirtymän kanssa vastakkaissuuntaisia, joten työn negatiivisuus on myös tältä kannalta ymmärrettävää.

Ratkaisu

$v = 41$ m/s, $m = 99$ kg, $h = 110$ m, $W = ?$

Hyppääjään vaikuttaa ilmanvastus, joka pienentää hyppääjän mekaanista energiaa. Tehtävän ratkaisemiseen käytetään siksi mekaniikan energiaperiaatetta $E_l - E_a = W$.

Valitaan potentiaalienergian nollatasoksi helikopteria 110 metriä alempana oleva taso ja systeemiksi hyppääjän ja Maan muodostama kokonaisuus.

Hyppääjään vaikuttaa kaksi voimaa: paino $\overline{G}$ ja ilmanvastus $\overline{F}_i$. Painovoima on systeemin sisäinen voima, joten ainoastaan ilmanvastus tekee työtä systeemiin. Hyppääjän mekaaninen energia on aluksi potentiaalienergiaa ja potentiaalienergian nollatasolla liike-energiaa, joten saadaan

$$E_l + E_a = W$$

$$(E_{pl} + E_{kl}) - (E_{pa} + E_{kl}) = W$$

$$(0 + \frac{1}{2}mv^2) - (mgh - 0) = W,$$

josta saadaan

$$W = \frac{1}{2}mv^2 - mgh$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 99\ \text{kg} \cdot (41\ \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - 99\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 110\ \text{m}$$

$$= -23\,621\ \text{J} \approx -24\ \text{kJ}.$$

Vastaus

Vastusvoimien tekemän työn suuruus on 24 kJ.

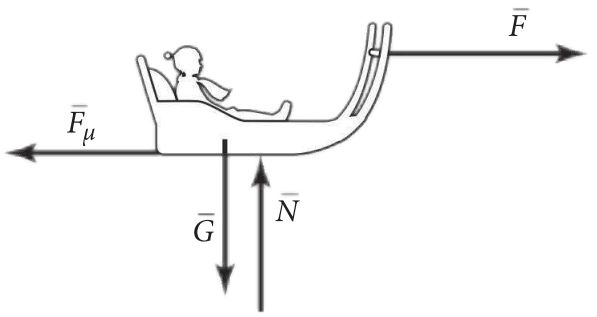
Tiivistelmä

- Voima tekee työtä.
- Työ on energian siirtoa voimien välityksellä.
- Työ voi olla positiivista tai negatiivista.
- Muuttuvan voiman tekemä työ määritetään graafisesta esityksestä fysikaalisena pinta-alana.
- Voiman tekemä työ vaikuttaa mekaaniseen energiaan.
- Mekaniikan energiaperiaate putoamisliikkeessä.

Perustehtävät

34. Mikä voima tekee työtä ja mihin muotoon voiman tekemä työ siirtää energiaa?
a) Auto jarruttaa voimakkaasti.
b) Paikallaan oleva pallo potkaistaan ilmaan.

35. Isä vetää lasta pulkassa vaakasuoralla tiellä niin, että vetävä voima on vaakasuorassa.
Mitkä pulkkaan vaikuttavista voimista tekevät työtä? Esim. 1



36. Polkupyörään vaikuttaa jarrutuksen aikana suuruudeltaan 25 N oleva keskimääräinen jarruttava kokonaisvoima. Kuinka suuren työn voima tekee, kun jarrutusmatka on 3,7 m? Esim. 1

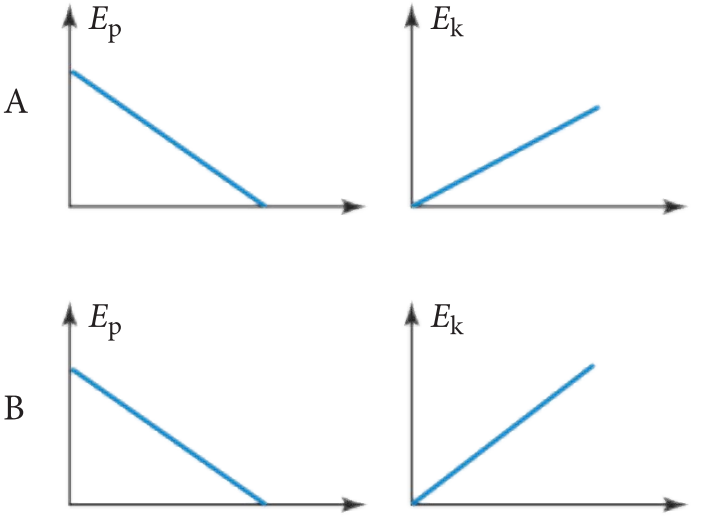
37. Painovoima tekee 15 J:n suuruisen työn pallon pudotessa 0,95 m korkealta pöydältä. Kuinka suuri pallon massa on? Esim. 1 ja 2

38. 100 gramman suklaalevy on pöydällä, jonka korkeus on 0,95 m.
a) Kuinka paljon levyn potentiaalienergia muuttuu, kun levy putoaa lattialle?
b) Mikä voima tekee työtä, kun levy putoaa?
c) Miten levyn kemiallinen energia muuttuu levyn putoamisessa? Esim. 2

39. Laukun massa on 3,7 kg. Kuinka suuren työn laukkuun vaikuttava kosketusvoima tekee, kun laukkua
a) nostetaan tasaisesti lattialta pöydälle, joka on 0,95 m korkea
b) pidetään minuutin ajan 0,95 cm:n korkeudella lattiasta
c) kannetaan selässä 11 metrin matka? Esim. 2

40. Tutki, miten pahvilevyn kiinnittäminen heilurin punnitukseen vaikuttaa heilurin mekaanisen energian säilymiseen.

41. Pallo pudotetaan 2 metrin korkeudelta. Kumpi graafisista esityksistä kuvaa mekaanisen energian säilymistä oikein?



Soveltavat tehtävät

42. Laskuvarjohyppääjä putoaa hypyn loppuvaiheessa vakionopeudella kohti maanpintaa.

a) Mitkä voimat hyppääjään vaikuttavat?

b) Mitkä voimat tekevät työtä hypyn aikana?

43. Laukun potentiaalienergia on alkutilanteessa lattiaan nähden 21 J ja lopputilanteessa 52 J. Laukku on levossa sekä alku- että lopputilanteessa.

a) Mitä laukulle tapahtuu?

b) Mikä muuttaa laukun mekaanista energiaa?

c) Kirjoita tapahtumasta mekaniikan energiaperiaatteen mukainen yhtälö.

d) Millä korkeudella lattiasta laukku on lopputilanteessa, jos sen massa on 4,9 kg ja jos potentiaalienergia on nolla lattian tasossa?

44. **a)** Auton massa on 890 kg. Kuinka suuren työn autoon vaikuttava kokonaisvoima tekee, kun auto kiihdytetään levosta nopeuteen 82 km/h?

b) Auton liike-energia on ennen jarrutusta 112 kJ. Auto pysähtyy 25 metrin matkalla. Kuinka suuri keskimääräinen jarruttava kokonaisvoima on?

45. Kiven massa on 1,2 kg. Sen potentiaalienergia muuttuu oheisen kuvaajan mukaisesti.

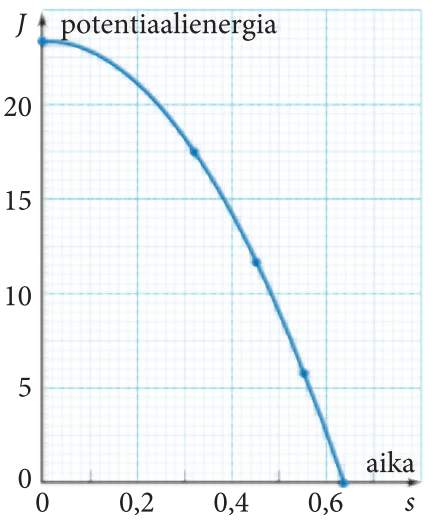
a) Miltä korkeudelta kivi on pudotettu?

b) Kuinka suuri on kiven liike-energia, kun se osuu maahan?

c) Mikä voima tekee kiven pudotessa työtä?

d) Kuinka suuri on kiven liike-energia hetkellä 0,25 s?

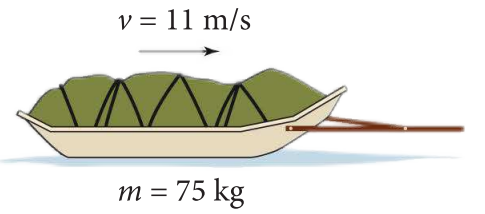
e) Mikä on kiven nopeus hetkellä 0,25 s?



46. Pulkan massa on 75 kg ja nopeus tasaisella tiellä 11 m/s.

a) Piirrä pulkan voimakuvio.

b) Kuinka suuri liikettä vastustava kokonaisvoima pulkkaan vaikuttaa, kun se pysähtyy 12 metrin matkalla?



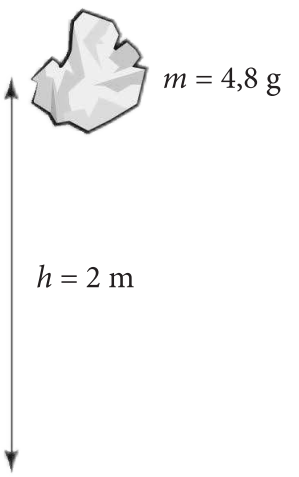
47. Polkupyöräilijä ajaa tasaisella tiellä. Hän lopettaa polkemisen, kun pyörän nopeus on 21 km/h. Pyörän nopeus hidastuu arvoon 16 km/h. Kuinka pitkällä matkalla hidastuminen tapahtuu, kun pyörään vaikuttaa hidastumisen aikana 31 N:n keskimääräinen kokonaisvoima? Pyörän ja pyöräilijän yhteinen massa on 95 kg.

48. Jännitetty jousipyssy laukaistaan suoraan ylöspäin. Nuoli nousee 28 metrin korkeudelle lähtöpaikastaan. Nuolen massa on 180 g. Kuinka suuri keskimääräinen voima nuoleen vaikuttaa, kun nuolta kiihdyttävä voima vaikuttaa 0,25 metrin matkalla?

49. Rutistettu paperiarkki, jonka massa on 4,8 g, pudotetaan 2,0 metrin korkeudelta. Paperi osuu maahan nopeudella 4,4 m/s.

a) Kuinka suuren työn ilmanvastus tekee?

b) Piirrä voimakuvio.



50. Pulkka lähtee liukuun mäen päältä nopeudella 1,8 m/s. Mäen pituus on 120 m ja korkeus 7,2 m. Kuinka suuri pulkan nopeus mäen alla on, kun pulkan ja laskijan yhteinen massa on 57 kg ja keskimääräinen kitkavoima 14 N?

4 Teho ja hyötysuhde kuvaavat energiansiirtoa

Kaivinkoneen teho on suurempi kuin lapiomiehen teho.

Teho ilmoittaa työntekonopeuden

Edellä on tutkittu tilanteita, joissa energia on muuntunut muodosta toiseen työn välityksellä. Sitä, miten aika liittyy näihin tilanteisiin, ei ole vielä pohdittu. Suuretta, joka kuvaa sitä, kuinka nopeasti jokin tietty työ tulee tehdyksi, eli työntekonopeutta, kutsutaan fysiikassa **tehoksi**. Teholla tarkoitetaan myös siirtyvän energian määrän ΔE ja siirtoon kuluneen ajan Δt suhdetta.

$$P = \frac{W}{\Delta t} \text{ ja } P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Tehon yksikkö on watti.

$$[P] = \frac{[W]}{[\Delta t]} = \frac{1\ \text{J}}{1\ \text{s}} = 1\ \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1\ \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^3} = 1\ \text{W}.$$

Teho

$P = \frac{W}{\Delta t}$, jossa

W on voiman tekemä työ ja

Δt on työhön käytetty aika.

$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$, jossa ΔE on siirtyvän energian määrä.

Tehon yksikkö on watti (1 W).

Laite	Teho (W)
energiansäästölamppu	11
lämpöpatteri	1 000
henkilöauto	100 000
kuorma-auto	240 000
jäänmurtaja	70 000 000

Eräiden laitteiden keskimääräisiä tehoja.

Autojen moottorien teho ilmoitetaan vielä joskus hevosvoimina, 1 hv = 746 W.

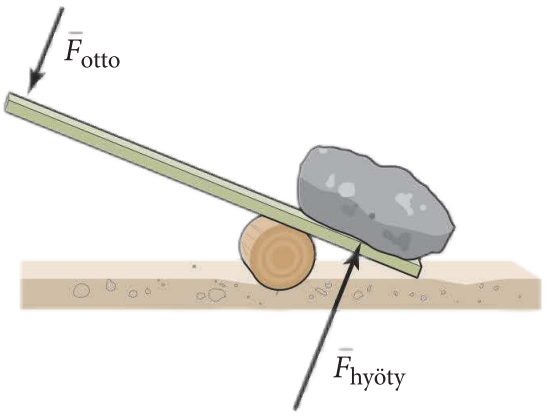
Laitteilla on erilaiset tehot

Watti on tuttu tehon yksikkö sähkölaitteista. Lamppu, jonka teho on 11 wattia, muuttaa sekunnissa 11 joulea sähkövirran välittämää energiaa valoksi ja lampun sekä ympäristön sisäenergiaksi. Hiustenkuivaaja on huomattavasti tehokkaampi kuin lamppu, sillä se välittää joka sekunti 1 600 joulea energiaa.

Tehon määritelmästä havaitaan, että työ ja työn siirtämän energian määrä voidaan ilmoittaa tehon ja ajan tulona $W = Pt$. Siten energian SI-yksikkö voidaan ilmoittaa muodossa 1 J = 1 Ws. Sähköä ostettaessa energian yksikkönä käytetään kilowattituntia kWh, joka on jouleina

$$\begin{aligned} 1\ \text{kWh} &= 1\,000\ \text{W} \cdot 3\,600\ \text{s} \\ &= 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J} \\ &= 3{,}6\ \text{MJ}. \end{aligned}$$

Yksinkertainen kone
Yksinkertainen kone on laite, jolla kappaleeseen vaikuttavan voiman suuruutta tai suuntaa voidaan muuttaa.



Voima $\overline{F}_{\text{otto}}$ tekee koneeseen ottotyön W_{otto}, ja kone tekee taakkaan hyötytyön $W_{\text{hyöty}}$. Hyötytyön tekee voiman $\overline{F}_{\text{taakka}}$ vastavoima $\overline{F}_{\text{hyöty}}$.

Yksinkertainen kone helpottaa työtä

Kiinni juuttuneen mutterin auki vääntäminen ja teepurkin kannen avaaminen ilman apuvälineitä on hankalaa. Mutteri avautuu jakoavaimella ja teepurkki esimerkiksi lusikan varrella. Molemmat apuvälineet ovat **yksinkertaisia koneita**. Yksinkertaisia koneita on niin työkalupakissa kuin keittiössäkin. Vipuja ovat esimerkiksi jakoavain, hohtimet ja purkinavaaja. Myös monimutkaisissa laitteissa, kuten nostokurjissa ja kaivinkoneissa, pätevät yksinkertaisten koneiden periaatteet.

Kone muuntaa voiman tekemän työn kautta energiaa muodosta toiseen. Koneen toimintaa voidaan kuvailla sen ottaman työn ja hyödyksi saadun työn avulla. Tarkastellaan esimerkkinä **vipua** koneena. Vipu välittää käyttäjänsä lihasten kemiallista energiaa nostettavan taakan potentiaalienergiaksi. Koneeseen vaikuttava voima $\overline{F}_{\text{otto}}$ tekee koneeseen ottotyön W_{otto}, ja kone tekee taakkaan hyötytyön $W_{\text{hyöty}}$. Hyötytyön tekee voiman $\overline{F}_{\text{taakka}}$ vastavoima $\overline{F}_{\text{hyöty}}$.

Työ kuvaa siirtyvän energian määrää, joten ottotyö ilmaisee koneen ottaman ottoenergian

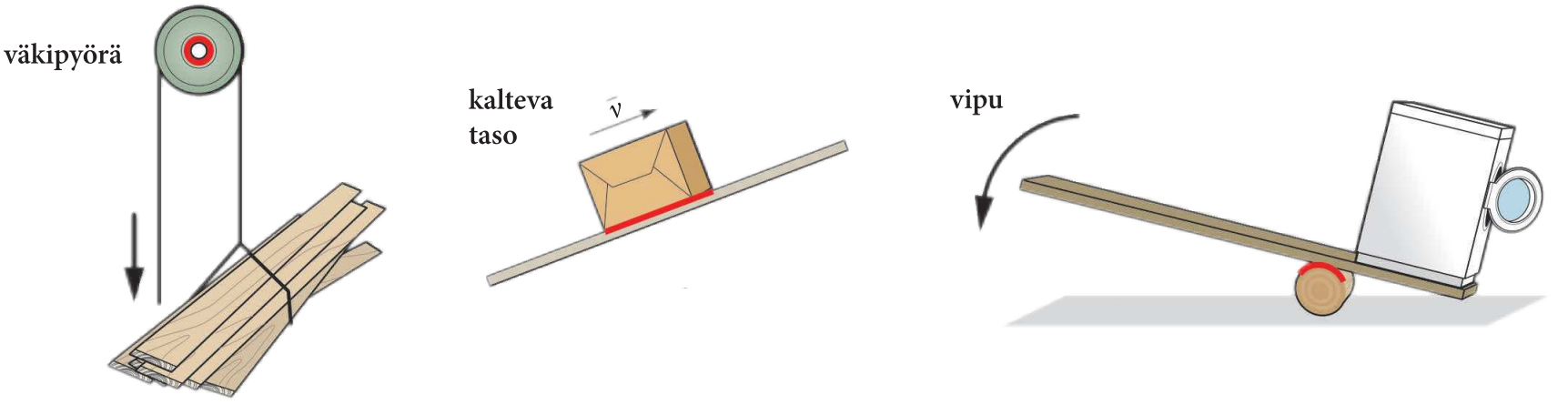
$$E_{\text{otto}} = W_{\text{otto}}.$$

Hyötytyö taas ilmaisee hyötyenergian

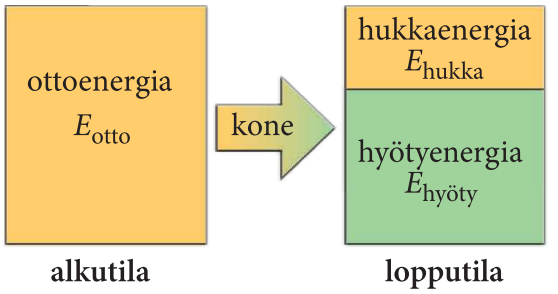
$$E_{\text{hyöty}} = W_{\text{hyöty}}.$$

Ideaalinen kone ei ole mahdollinen

Mitä lähempänä hyötyenergian arvo on ottoenergian arvoa, sitä parempi kone on. Ideaalinen kone siirtäisi ottoenergian 100-prosenttisesti hyötyenergiaksi. Tällaista konetta ei ole kuitenkaan mahdollista rakentaa. Tällaista ideaalista konetta sanotaan **ensimmäisen lajin ikiliikkujaksi.**



Kitka muuntaa mekaanista energiaa systeemin sisäenergiaksi. Hankauskitkan tekemä työ lämmittää akselia (väkipyörä), laatikkoa ja alustaa (kalteva taso) ja tukea (vipu). Tätä kuvataan kuvissa punaisella.



$E_{otto} = E_{hyöty} + E_{hukka}$

Hyötysuhde

$$\eta = \frac{E_{hyöty}}{E_{otto}} = \frac{W_{hyöty}}{W_{otto}} = \frac{P_{hyöty}}{P_{otto}}$$

Hyötysuhde on aina pienempi kuin yksi. Ikiliikkuja on mahdoton.

Hyötysuhde on aina pienempi kuin yksi

Koneen osien hankauksessa syntyvä kitkavuorovaikutus siirtää ottoenergiaa muiksi energiamuodoiksi. Tämä havaitaan koneen osien lämpenemisenä ja äänenä, joka sekin lopulta aiheuttaa ilman ja muun ympäristön lämpenemistä. Todellisissa koneissa vuorovaikutukset ympäristön kanssa ja koneiden sisäiset vuorovaikutukset muuntavat aina ottoenergiaa myös hyödyttömään muotoon. Ottoenergian ja hyötyenergian erotusta sanotaan hukkaenergiaksi E_{hukka}.

$E_{hukka} = E_{otto} - E_{hyöty} = W_{otto} - W_{hyöty}$

Energioiden avulla voidaan määritellä koneen jatkuvaa toimintaa kuvaavat ottoteho

$$P_{otto} = \frac{W_{otto}}{\Delta t} = \frac{E_{otto}}{\Delta t}$$

ja hyötyteho

$$P_{hyöty} = \frac{W_{hyöty}}{\Delta t} = \frac{E_{hyöty}}{\Delta t}.$$

Koneen **hyötysuhde** kertoo, kuinka suuri osa koneeseen tuodusta energiasta saadaan hyödyksi. Hyötysuhteen tunnus on η (eeta).

Hyötysuhde ilmoitetaan usein prosentteina. Jos tunnetaan koneen hyötysuhde ja ottoenergia, hyötyenergia on $E_{hyöty} = \eta E_{otto}$.

Toiminto	Ominaisteho (W/kg)
nukkuminen	1,1
istuminen	1,5
seisominen	2,6
kävely	4,2
pyöräily	7,6
uinti	11
hiihto	15
juoksu	18

Ihmisen keskimääräisiä ominaistehoja.

Ravintoaine	Energiasisältö (kJ/g)
hiilihydraatti	17,2
valkuaisaine	17,6
rasva	38,9

Ravintoaineiden keskimääräiset energiasisällöt.

Ihmisen tehokin voidaan mitata

Suurin osa ihmisen päivittäisestä energiantarpeesta menee peruselintoimintojen, kuten verenkierron ja hengityksen ylläpitämiseen. Tätä energiankäyttöä kutsutaan perusaineenvaihdunnaksi. Ilman ylläpitävää energiaa keho ei toimi.

Ihminen kuluttaa tunnissa energiaa noin 4 kJ kehon yhtä kilogrammaa kohden. Levossa olevan miehen perusaineenvaihdunnan ominaisteho eli teho jolla keho muuntaa energiaa peruselintoimintojen ylläpitämiseen, on 1,2 W/kg. Naisen ominaisteho on pienempi eli 1,1 W/kg.

Työskentely ja liikunta kasvattavat energiankäyttöä, ja näin myös aineenvaihdunnan ominaisteho muuttuu. Lukioikäisen, liikuntaa harrastavan henkilön energiantarve on vuorokaudessa noin 14 MJ. Tästä energiasta 55–60 prosenttia suositellaan saatavaksi hiilihydraateista, 10–15 prosenttia valkuaisaineista ja noin 30 prosenttia rasvoista. Hiilihydraattien lähteitä ovat esimerkiksi puuro, leipä, riisi, peruna, pasta, juurekset ja hedelmät. Valkuaisaineita saadaan lihasta, kalasta, munista, maidosta, viljasta ja kasviksista. Rasvasta vähintään kahden kolmasosan pitäisi olla tyydyttymätöntä rasvaa: kasvimargariineja, öljyjä ja kalan rasvaa. Tyydyttyneitä rasvoja saa esimerkiksi voista, juustosta, rasvaisesta lihasta ja esimerkiksi suklaasta.

Esimerkki 1 — Teho ja työ

Sähkömoottori tekee 5920 joulen suuruisen nostotyön 56 sekunnissa.
a) Kuinka suuri on moottorin hyötyteho?
b) Kuinka suuren työn moottori tekee 1,5 minuutissa samalla teholla?

Huomaa!

Usein puhutaan moottorin tekemästä työstä, kun on vaikea määritellä työtä tekevä voima. Nostotyön tekee nostettavaan kappaleeseen vaikuttava kosketusvoima, esimerkiksi vaijerin jännitysvoima.

Ratkaisu

a) $W = 5920\ \text{J}$, $\Delta t = 56\ \text{s}$, $P = ?$

Tehon määritelmän mukaan $P = \dfrac{W}{\Delta t}$,

josta sijoittamalla tunnetut arvot saadaan

$$P = \frac{5920\ \text{J}}{56\ \text{s}} = 105{,}7143\ \frac{\text{J}}{\text{s}} \approx 110\ \text{W}.$$

b) $\Delta t = 1{,}5\ \text{min} = 90\ \text{s}$, $W = ?$

Ratkaistaan työ tehon yhtälöstä

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad \Big| \cdot \Delta t$$

$$W = P\Delta t.$$

Sijoitetaan tunnetut arvot:

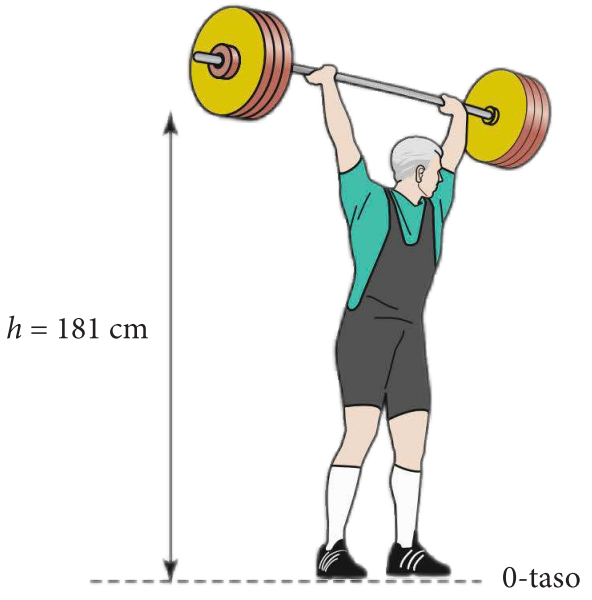
$$W = 105{,}7143\ \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 90\ \text{s} = 9\,514{,}287\ \text{J} \approx 9\,500\ \text{J}.$$

Vastaus

a) Moottorin hyötyteho on 110 W.
b) Työ on 9500 J.

Esimerkki 2 — Nostotyön teho

Painonnostaja tempaisee 95 kilon painot lattialta suorille käsille. Painot nousevat nostossa 181 senttimetriä, ja nosto kestää 1,8 sekuntia. Laske painoja siirtävän kosketusvoiman keskimääräinen teho.



Ratkaisu

$m = 95\ \text{kg}$, $h_1 = 0\ \text{m}$, $h_2 = 1{,}81\ \text{m}$, $\Delta t = 1{,}8\ \text{s}$, $P_\text{k} = ?$

Voiman nostossa tekemä työ on mekaniikan energiaperiaatteen mukaan yhtä suuri kuin painojen potentiaalienergian muutos. Valitaan potentiaalienergian nollatasoksi lattian taso. Tällöin

$$P_\text{k} = \frac{\Delta E_\text{p}}{\Delta t}$$

$$= \frac{mgh_2 - mgh_1}{\Delta t}$$

$$= \frac{95\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1{,}81\ \text{m} - 95\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0\ \text{m}}{1{,}8\ \text{s}}$$

$$= 937{,}1275\ \text{W}$$

$$\approx 940\ \text{W}.$$

Vastaus

Painoja siirtävän kosketusvoiman keskimääräinen teho on 940 W.

Esimerkki 3 — Pumpun hyötysuhde

Pumppu nostaa vettä 1,4 m³ tunnissa 15 metrin korkeudella olevaan astiaan. Pumpun hyötysuhde on 0,75. Kuinka suuren tehon pumppu ottaa sähköverkosta?

Ratkaisu

$m = 1\,400$ kg, $g = 9{,}81$ m/s², $h_2 = 15$ m, $h_1 = 0$ m, $\Delta t = 1$ h,
$\eta = 0{,}75$, $P_{otto} = ?$

Veden nostamista voidaan käsitellä energian muutosten avulla. Alkutilassa vesi on 15 metrin syvyydessä. Valitaan potentiaalienergian nollatasoksi vedenpinta kaivon pohjalla. Tunnin kuluttua 1,4 m³ vettä on nostettu 15 metrin korkeuteen, joten sen potentiaalienergian muutos on

$$\Delta E_p = mgh_2 - mgh_1.$$

Tehon määritelmän mukaan

$$P_h = \frac{\Delta E_p}{\Delta t} = \frac{mgh_2 - mgh_1}{\Delta t}.$$

Sijoitetaan yhtälöön tunnetut arvot:

$$P_h = \frac{1400\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 15\ \text{m} - 1400\ \text{kg} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0\ \text{m}}{3600\ \text{s}}$$

$$= 57{,}225\ \text{W}.$$

Hyötysuhteen määritelmästä $\eta = \frac{P_{hyöty}}{P_{otto}}$ saadaan

$$P_{otto} = \frac{P_{hyöty}}{\eta} = \frac{57{,}225\ \text{W}}{0{,}75} = 76{,}3\ \text{W} \approx 76\ \text{W}.$$

Vastaus

Pumppu ottaa 76 watin tehon sähköverkosta.

Esimerkki 4 — Hyötysuhde

Erään sähkömoottorin hyötysuhde on 81 %. Kuinka suurella ottoteholla sitä on käytettävä, jotta siitä saataisiin 15 kW:n hyötyteho?

Ratkaisu

$\eta = 81\ \%$, $P_{hyöty} = 15$ kW, $P_{otto} = ?$

Hyötysuhteen määritelmän mukaan

$\eta = \frac{P_{hyöty}}{P_{otto}}$, josta ratkaistaan

$$P_{otto} = \frac{P_{hyöty}}{\eta}.$$

Sijoitetaan tunnetut arvot:

$$P_{otto} = \frac{15\ \text{kW}}{0{,}81} = 18{,}5185 \approx 19\ \text{kW}.$$

Vastaus

Ottotehon on oltava 19 kW.

Tiivistelmä

- Teho ilmoittaa työntekonopeuden.
- Yksinkertainen kone helpottaa työtä.
- Hyötysuhde on aina pienempi kuin yksi.
- Ihmisen tehokin voidaan mitata.

Perustehtävät

51. Mitkä seikat vaikuttavat tehon suuruuteen?

52. Miksi polttomoottorilla toimivan auton hyötysuhde on vain 17 %?

53. Miksi sähkömoottorin hyötysuhde on parempi kuin polttomoottorin hyötysuhde?

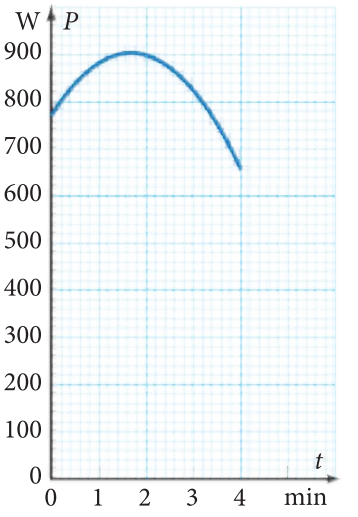
54. Selvitä seuraavien yksinkertaisten koneiden rakenne ja se, missä käytännön tilanteissa niitä käytetään:
a) vipu
b) kalteva taso
c) väkipyörä.

55. Koneen teho on 1 500 W. Kuinka suuren työn kone tekee 15 minuutissa? Esim. 1

56. Lamppu käyttää valaisuun ja ympäristön lämmittämiseen 750 J sähköenergiaa. Kuinka kauan lamppu oli valaisemassa, kun lampun teho on 11 W?

57. Kuinka suuri rakennusnosturin nostoteho on, jos nosturi nostaa massaltaan 420 kg:n taakan, jonka massa on 420 kg, 7,5 metrin korkeuteen 6,8 sekunnissa? Esim. 2

58. Urheilijan suoritusteho vaihteli rasituskokeessa oheisen kuvion mukaisesti.



a) Kuinka suuri urheilijan suoritusteho oli ajanhetkellä $t = 1{,}0$ min?
b) Millä ajanhetkellä urheilijan suoritusteho on 800 W?
c) Miksi urheilijan suoritusteho laski rasituskokeen loppua kohti?

Soveltavat tehtävät

59. Laitteen hyötyteho on 130 W ja hyötysuhde 65 %. Kuinka suuri laitteen ottoteho on?

60. Veden virtausnopeuden yksikkö on 1 m^3/s (kuutiometriä sekunnissa). Mitä yhteistä on suureilla virtausnopeus ja teho?

61. Vesipumpun ottoteho on 1,8 kW ja hyötysuhde 78 %. Kuinka nopeasti pumppu täyttää 50 litran saavin, kun veden nostokorkeus on 3,6 m?

62. Henkilö, jonka massa on 85 kg, kiirehtii työpaikalleen. Hän nousee 5,2 sekunnissa portaat toiseen kerrokseen, joka on 3,2 metriä ensimmäistä kerrosta korkeammalla. Kuinka suuri henkilön nousuteho on?

63. Auton suorituskykyä testataan ajamalla 400 metrin matka mahdollisimman nopeasti seisovalla lähdöllä. Auton massa on 1 150 kg, ja aikaa kiihdytykseen kuluu 16,1 sekuntia. Auton loppunopeus on 143 km/h. Laske autoa kiihdyttävän kokonaisvoiman keskimääräinen teho.

64. Hissi nousee pohjakerroksesta kolmanteen kerrokseen 15 sekunnissa. Nousukorkeus on 14 m ja hissin massa 1 250 kg. Kuinka suuri hissiä nostavan vaijerin tukivoiman keskimääräinen teho on?

65. Sähkömoottorin hyötysuhdetta tutkittiin nostotyössä. Kulutusmittarista havaittiin, että sähkömoottori käyttää nostotyössä 240 J energiaa. Nostettavana oli 21 kg:n taakka, ja nostokorkeus oli 1,0 m. Laske moottorin hyötysuhde.

5 Lämpötilan muutos vaikuttaa kappaleen ominaisuuksiin

Kattilan kiehuessa liedellä havaitaan kaikki kolme lämmön siirtymistapaa.

Lämpö siirtyy kolmella tavalla

Kun vesikattila pannaan liedelle kuuman levyn päälle, levystä siirtyy energiaa kattilaan ja siinä olevaan veteen. Kuumana hohkaavan levyn lämmön voi tuntea koskettamatta levyä.

Lapissa lämpötilat voivat keväällä muuttua jopa kymmenellä asteella muutamassa tunnissa, jos ilmavirta tulee yli Skandien vuoriston.

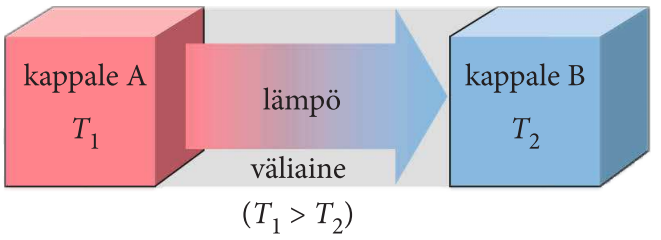
Edellä mainituissa esimerkeissä energia siirtyy systeemistä toiseen eri tavalla. Lämpötilaeron takia siirtyvää energiaa kutsutaan **lämmöksi**.

Lämpöä voi siirtyä systeemistä toiseen kolmella tavalla:

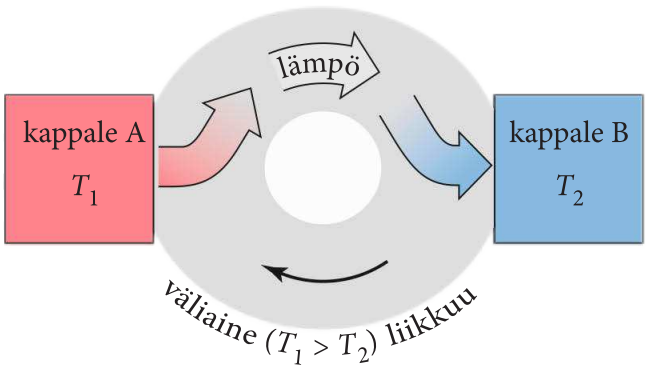
- **johtumalla** aineessa, vaikka aine itsessään ei siirry
- **kuljettumalla** väliaineen mukana
- **säteilemällä** sähkömagneettisena säteilynä.

Hehkulampun lämpövaikutus perustuu lämmön säteilyyn ja kuljetukseen.

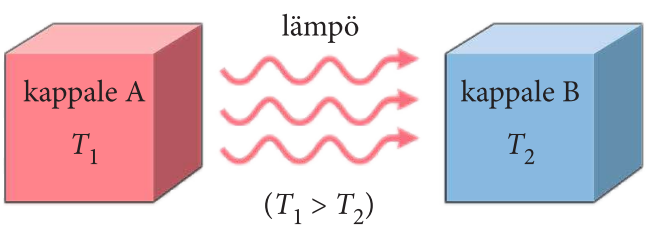
Kaukolämpöputkissa lämpö siirtyy useita kymmeniä kilometrejä.



Lämpö johtuu väliaineessa.



Lämpö sitoutuu aineeseen ja kulkeutuu sen mukana pitkiäkin matkoja.



Lämpö siirtyy ilman väliainetta.

Lämpö siirtyy johtumalla aineessa

Lämpö tarvitsee väliaineen, jotta se voi siirtyä **johtumalla** ympäristöstä systeemiin ja systeemistä ympäristöön. Lämmön johtuminen havaitaan käytännössä esimerkiksi kuumaan teehen laitetussa metallisessa lusikassa. Lämpö johtuu hyvin metallissa ja ennen pitkää koko lusikka on lämmin. Ainetta, jossa lämpö johtuu hyvin, sanotaan **lämmönjohteeksi.** Metallit ovat hyviä lämmönjohteita.

Jos kuumaan teehen laitetaan muovinen lusikka, lusikka ei lämpene teen yläpuolelta läheskään yhtä voimakkaasti kuin metallilusikka. Muovit ovat hyviä **lämmöneristeitä**. Muoveja käytetään esimerkiksi talojen lämmöneristeinä.

Mikrotasolla tarkasteltuna lämmön siirtyminen johtumalla aineesta toiseen ja aineen sisällä voidaan selittää mikroskooppisten rakenneosien avulla. Kuumassa kappaleessa mikroskooppiset rakenneosat värähtelevät enemmän kuin kylmässä, ja tämä värähtely etenee aineessa.

Lämpö siirtyy kuljettumalla aineen mukana

Lämmön kuljetuksessa energiaa siirtyy liikkuvan väliaineen mukana. Kun lämpöpatterin vesi lämpenee lämminvesivaraajassa, veden sisäenergia kasvaa. Kun pattereissa kiertävä vesi jäähtyy, sen sisäenergia pienenee. Samalla lämpöä siirtyy ympäristöön. Myös ilma- ja nestevirtaukset kuljettavat energiaa. Energia on kuljettavan aineen sisäenergiaa. Esimerkiksi Golfvirta kuljettaa lämmintä vettä Karibianmereltä Pohjois-Eurooppaan.

Lämpö siirtyy myös säteilemällä

Kun lämmin kappale **säteilee**, sen sisäenergia pienenee ja kappale jäähtyy. Energiaa kulkeutuu kappaleesta ympäristöön sähkömagneettisen säteilyn mukana. Sähkömagneettinen säteily ei vaadi siirtyäkseen väliainetta vaan se etenee myös tyhjiössä. Ellei näin olisi, Auringon energiasta ei voitaisi nauttia, koska avaruudessa vallitsee lähes tyhjiö. Kaikki kappaleet säteilevät lämpöä niin, että kappaleen säteilyn kokonaisteho kasvaa, kun kappaleen lämpötila nousee.

Sillan lämpölaajeneminen on mahdollista, koska sillan kannen päät ovat elastisen levyn tai laakerirullan päällä.

Lämpötila vaikuttaa kappaleen kokoon

Lämpötilan muuttuminen vaikuttaa kappaleiden pituuteen, pinta-alaan ja tilavuuteen. Esimerkiksi pitkät sillat kiinnitetään usein vain toisesta päästä ja toinen pää jätetään eräänlaisten laakerirullien päälle, koska lämpötilan muuttuessa myös sillan pituus muuttuu.

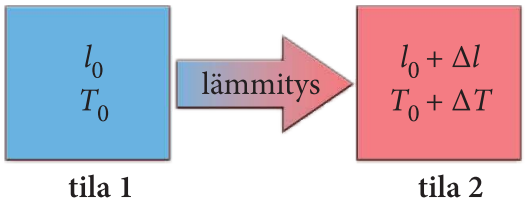
Yleensä aine laajenee, kun sitä lämmitetään. Kiinteät aineet ja nesteet laajenevat melko vähän, koska rakenneosien välillä on kemiallisia sidoksia. Kaasussa rakenneosat pääsevät liikkumaan lähes vapaasti, joten kaasu laajenee lämpötilan noustessa enemmän kuin kiinteä aine ja neste. Suljetussa astiassa oleva kaasu täyttää koko astian, ja sen pyrkimys laajenemiseen näkyy paineen kasvuna astiassa.

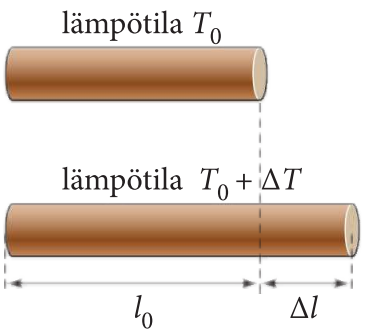
Rakennusten rakenteita suunniteltaessa materiaalien laajeneminen ja kutistuminen täytyy ottaa huomioon. Esimerkiksi betonin ja raudan pituuden lämpötilakertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan, joten betonin rakennelujuutta voidaan parantaa raudoituksen avulla.

Nesteet laajenevat enemmän kuin kiinteät aineet. Tämä on otettava huomioon, kun säilytettään nesteitä suljetuissa astioissa. Esimerkiksi kesäkuumalla ei kannata täyttää auton bensiinitankkia aivan täyteen, jos auto joutuu heti tankkauksen jälkeen seisomaan auringonpaisteessa.

Kaasu laajenee lämpötilan kasvaessa.

Kaasu- ja öljyputkiin rakennetaan mutkia, jotka joustavat, kun putkien pituus muuttuu lämpötilan vaihtelujen vuoksi.





Metallitankojen tapauksessa lämpötilan lisäys kasvattaa tangon pituutta ja vastaavasti jäähdyttäminen lyhentää tankoa.

Lämpötilan muutoksesta aiheutuva pituuden muutos

$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$,

jossa

α on pituuden lämpötilakerroin,

l_0 on alkuperäinen pituus ja

ΔT on lämpötilamuutos.

Huomaa!

$\Delta t = \Delta T$

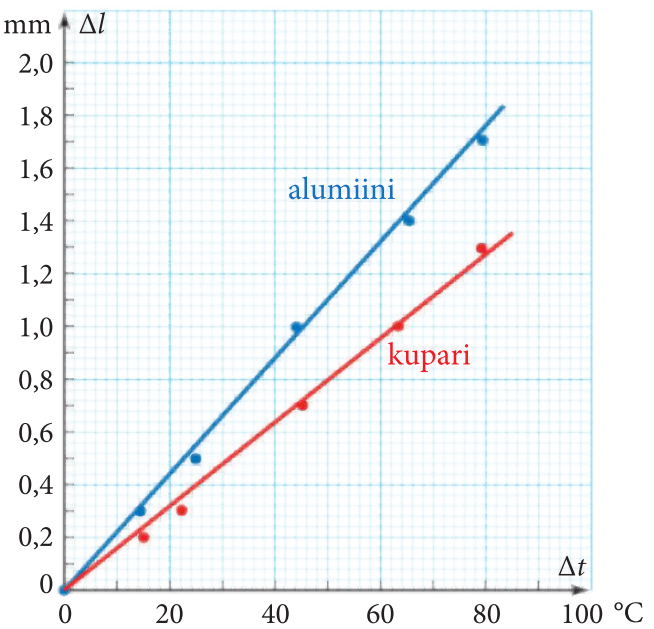
Pituus muuttuu lämpötilan muuttuessa

Kun tutkitaan kiinteän kappaleen pituuden muuttumista lämpötilamuutoksen funktiona, niin havaitaan, että pituus muuttuu sitä enemmän, mitä suurempia lämpötilamuutos ΔT ja alkuperäinen pituus l_0 ovat. Muutos on myös aineesta riippuvainen. Tätä aineen ominaisuutta kuvaa **pituuden lämpötilakerroin** α. Pituuden lämpötilakerroin ilmaisee, miten kappaleen pituus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Lämpötilan muutoksesta aiheutuva pituuden muutos on siten $\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$.

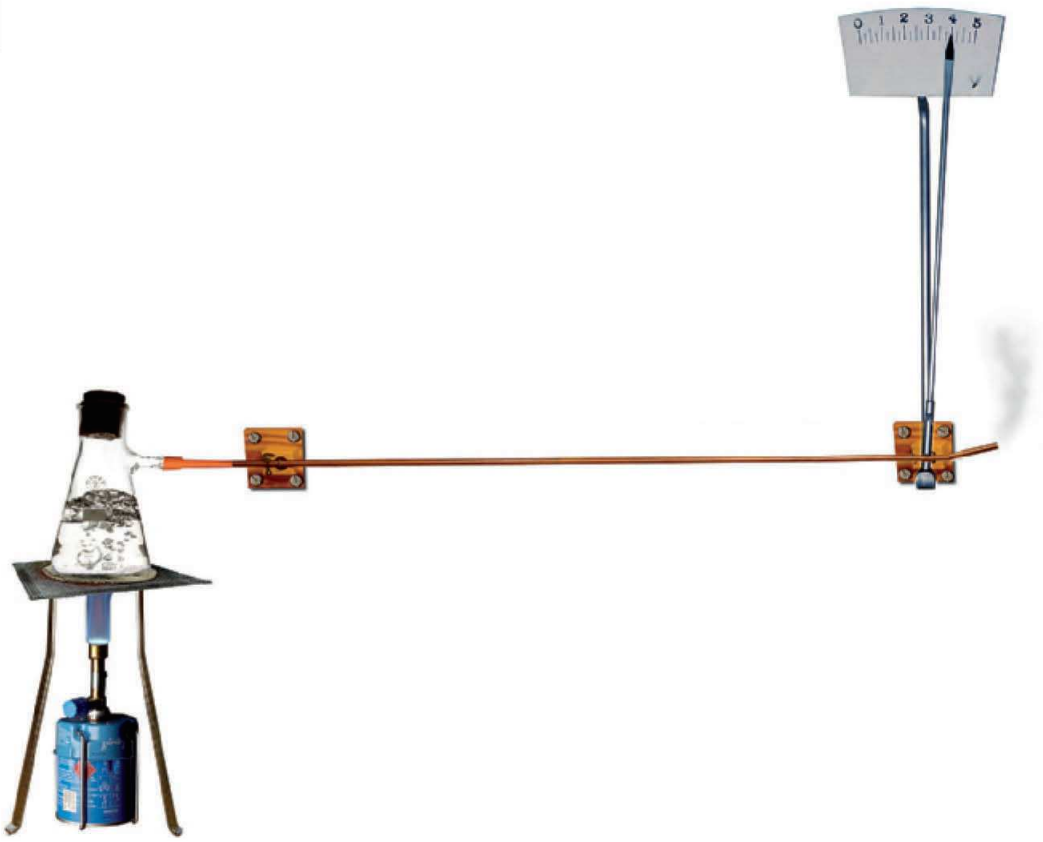
Eri aineiden pituuden lämpötilakertoimien arvot löytyvät taulukkokirjasta. Kun yhtälöstä ratkaistaan α, pituuden lämpötilakertoimen yksiköksi saadaan

$$[\alpha] = \frac{[\Delta l]}{[\Delta T] \cdot [l_0]} = \frac{1\ \text{m}}{1\ \text{K} \cdot 1\ \text{m}} = \frac{1}{1\ \text{K}} = 1\frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

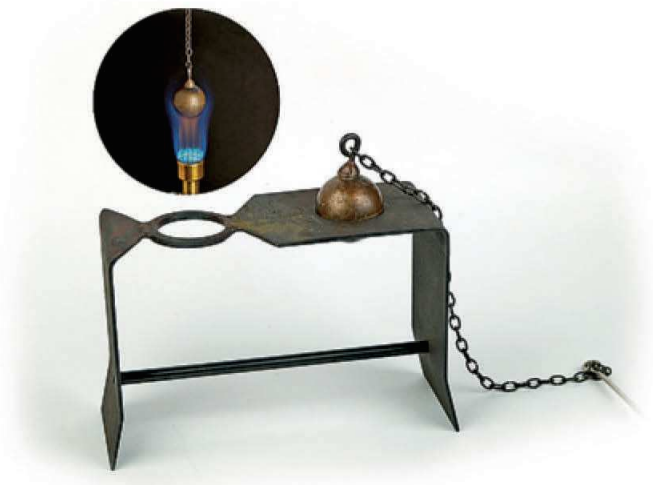
Edellä esitetty pituuden muutosta kuvaava yhtälö on **tilanyhtälö**. Se kuvaa, miten systeemi siirtyy tilasta toiseen, kun lämpötila muuttuu. Sen avulla voidaan ennustaa, miten pituus muuttuu, kun tangon lämpötilaa muutetaan.



Pituuden muutos Δl on suoraan vennollinen lämpötilan muutokseen Δt.



Vesihöyry (100 °C) lämmittää metalliputken. Putki laajenee lämmetessään.



Metallipallon ja reikälevyn avulla voidaan tutkia lämpölaajenemista. Kylmä pallo mahtuu reikään. Kuumennettu pallo ei mahdu reiän läpi. Kuumennettukin pallo saadaan reiästä läpi kuumentamalla reiän ympäristöä.

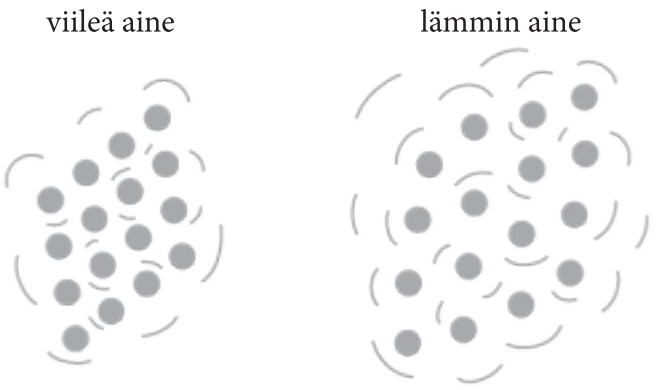
Kiinteän aineen pinta-alan ja tilavuuden lämpölaajeneminen

$\Delta A = \beta A_0 \Delta T$, jossa
A_0 on alkuperäinen pinta-ala,
ΔT on lämpötilan muutos ja
β on pinta-alan lämpötilakerroin.

$\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$, jossa
γ on tilavuuden lämpötilakerroin,
V_0 on alkuperäinen tilavuus,
$\beta = 2\alpha$ ja $\gamma = 3\alpha$.

Nesteiden tilavuuden lämpölaajeneminen

$\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$, jossa
γ on nesteen tilavuudenlämpötilakerroin,
V_0 on nesteen alkuperäinen tilavuus ja
ΔT on lämpötilan muutos.



Useimpien aineiden rakenneosien värähtely kasvaa, kun ainetta lämmitetään. Värähtely pienenee, kun aine jäähtyy.

Pinta-ala ja tilavuus muuttuvat lämpötilan muuttuessa

Kun rautatiekisko tai metallilevy lämpenee, se ei ainoastaan pitene, vaan muutosta tapahtuu kaikkiin suuntiin. Homogeeninen aine laajenee samalla tavalla kaikkiin suuntiin, jolloin sen pituuden suhteellinen muutos määrää myös pinta-alan ja tilavuuden suhteellisen muutoksen.

Kiinteiden aineiden pienet lämpötilan muutokset aiheuttavat pienen pituuden muutoksen. Samalla tavalla sekä pinta-alan että tilavuuden muutos on verrannollinen lämpötilan muutokseen ja samalla pinta-alan tai tilavuuden alkuperäiseen arvoon. Tällöin pinta-alan ja tilavuuden muutoksille ΔA ja ΔV on voimassa lämpölaajenemista mallintavat yhtälöt $\Delta A = \beta A_0 \Delta T$ ja $\Delta V = \gamma V_0 \Delta T$. Nämä yhtälöt pätevät suoraan vain homogeenisiin, kiinteisiin aineisiin, ja siten esimerkiksi heterogeeninen puutikku ei lämpölaajene edellä mainittujen yhtälöiden mukaan.

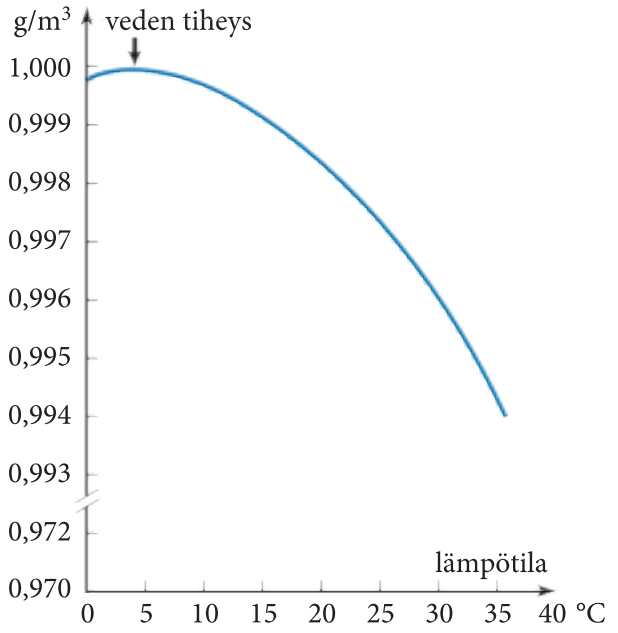
Pinta-alan lämpötilakertoimelle voidaan johtaa yhtälö $\beta = 2\alpha$ ja **tilavuuden lämpötilakertoimelle** yhtälö $\gamma = 3\alpha$. Kiinteiden aineiden pinta-alan ja tilavuuden lämpötilakertoimet lasketaan taulukosta löytyvien pituuden lämpötilakertoimien avulla.

Lämpölaajeneminen selitetään mikromallin avulla

Metallikappaleen sisäenergia muuttuu, kun siihen tuodaan tai siitä poistuu energiaa. Energiaa voidaan tuoda kappaleeseen lämmittämällä kappaletta tai tekemällä työtä siihen. Energiaa poistuu, kun kappale jäähtyy tai tekee työtä. Esimerkiksi kitkatyö lisää kappaleen sisäenergiaa.

Metallikappaleen sisäenergian kasvu näkyy sen rakenneosien liikkeen voimistumisena. Rakenneosat värähtelevät tasapainoasemansa ympärillä sitä laajemmalla alueella, mitä korkeampi kappaleen lämpötila on. Rakenneosat eivät itse laajene, vaan niiden keskimääräinen etäisyys kasvaa. Tästä johtuen värähtelevät rakenneosat tarvitsevat enemmän tilaa, mikä näkyy makrotasolla kappaleen tilavuuden kasvamisena. Kun kappale jäähtyy, rakenneosien värähtely heikkenee ja rakenneosat tarvitsevat vähemmän tilaa. Tällöin kappaleen tilavuus pienenee.

Aine laajenee lämmetessään sitä enemmän, mitä heikompia aineen rakenneosien väliset kemialliset sidokset ovat.



Vesi on tiheimmillään +4 °C:n lämpötilassa.

Veden lämpölaajeneminen poikkeaa muista nesteistä

Nesteille ei voida määrittää pituuden- eikä pinta-alan lämpötilakertoimia. Niille on tarkoituksenmukaista määrittää suoraan tilavuuden lämpötilakertoimen γ arvot. Näitä löytyy taulukkokirjasta.

Yleensä nesteet laajenevat, kun lämpötila kasvaa. Vesi on poikkeus muista nesteistä. Veden tiheys on suurin, kun sen lämpötila on 4 °C. Kun vesi lämpenee 0 °C:sta 4 °C:seen, vesimolekyylit pääsevät lähemmäksi toisiaan, jolloin veden tiheys kasvaa tilavuuden pienentyessä. Kun lämpötila nousee 4 °C:sta, veden tiheys pienenee.

4 °C:n veden tiheys on suurin, joten tässä lämpötilassa oleva vesi on myös raskainta. Kun vesistöt jäähtyvät syksyllä, tässä lämpötilassa oleva vesi painuu pohjaan. Lopulta pinnalla oleva 0 °C:n vesi jäätyy. Jään tiheys on pienempi kuin 0 °C:n veden, joten jää kelluu veden pinnalla.

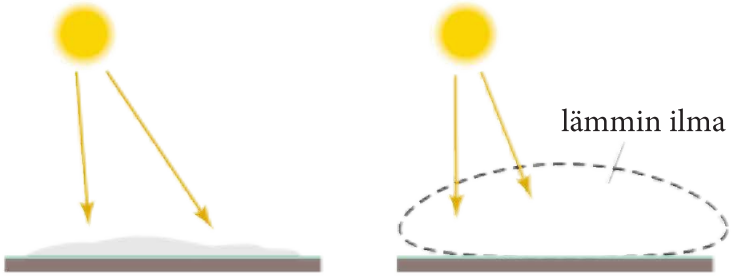
Vesi laajenee jäätyessään.

Esimerkki 1 — Lämmön siirtyminen

Selitä lämpöopin käsitteitä käyttäen, miten nouseva ilmavirtaus syntyy.

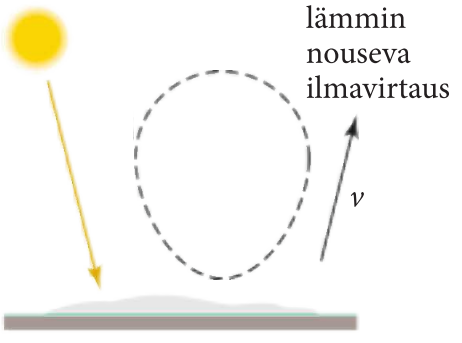
Ratkaisu

Energiaa siirtyy säteilemällä Auringosta maanpinnalle. Lämpösäteily lämmittää maanpintaa ja lämpöä siirtyy johtumalla lämmenneestä maapinnasta yläpuolella olevaan ilmamassaan.



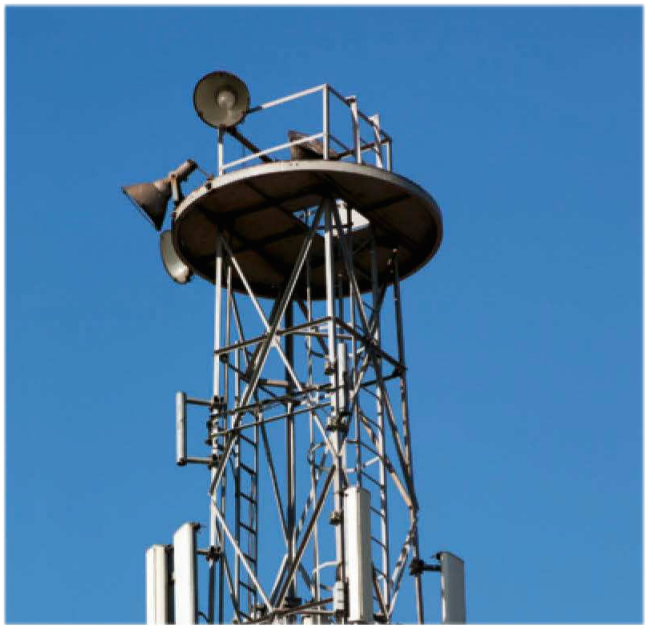
ympäristöä voimakkaammin kuumeneva maanpinnan kohta

Lämmin ilma on harvempaa ja siten myös kevyempää kuin kylmä ilma, joten lämmennyt ilmamassa nousee ylöspäin. Syntyy nouseva ilmavirtaus. Lämpö siirtyy kuljettumalla ilmamassan mukana.



Esimerkki 2 — Pituuden lämpölaajeneminen

Teräksisen linkkimaston pituus on 105 m. Kuinka paljon pitempi se on kesähelteellä kuin talvipakkasella, kun lämpötilan vaihteluväli on −29 °C…+29 °C?



Ratkaisu

$l_0 = 105\ \text{m},\ t_1 = -29\ °\text{C},\ t_2 = 29\ °\text{C},\ \Delta l = ?$

Koska tehtävässä tarkastellaan lämpötilan muutoksia, laskuissa voidaan käyttää celsiusasteita. Ja koska merkintöjen ei ole vaara sekoittua ajan kanssa, lämpötilan tunnuksena voidaan käyttää t:tä. Teräksen pituuden lämpötilakerroin α on taulukkokirjan mukaan $12 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°\text{C}}$. Maston pituus muuttuu annetulla lämpötilavälillä määrän $\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$. Sijoitetaan tunnetut arvot yhtälöön:

$$\Delta l = 12 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°\text{C}} \cdot 105\ \text{m} \cdot \left(29\ °\text{C} - (-29\ °\text{C})\right)$$

$$\Delta l = 12 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°\text{C}} \cdot 105\ \text{m} \cdot 58\ °\text{C}$$

$$= 0{,}0731\ \text{m} \approx 7{,}3\ \text{cm}.$$

Vastaus

Linkkimaston pituusero kesän ja talven välillä on 7,3 cm.

Esimerkki 3 — Pituuden lämpötilakerroin

Opiskelijat mittasivat lämpötilan vaikutusta metalliputken pituuteen. Tutkimus tehtiin kahdella eri metallista valmistetulla putkella, joiden pituus oli aluksi 950 mm. Tulokset taulukoitiin ja niistä piirrettiin kuvaaja taulukkolaskentaohjelman avulla.

a) Mitä kuvaajasta huomataan?

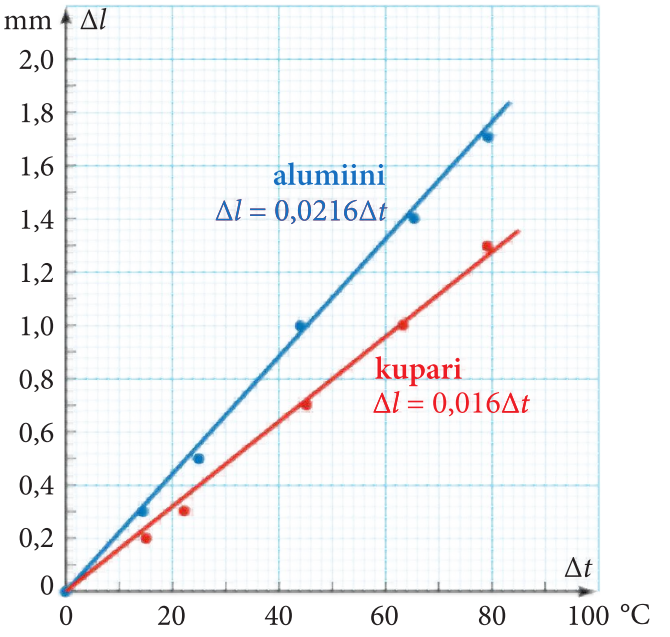
b) Määritä mittaustulosten avulla kuparin pituuden lämpötilakertoimen arvo.

Lämpötila t (°C)	Lämpötilan muutos Δt (°C)	Al-putken pituuden muutos Δl (mm)
21,0	0	0
35,0	14,0	0,3
45,4	24,4	0,5
64,8	43,8	1,0
86,2	65,2	1,4
100,0	79,0	1,7

lämpötila t (°C)	lämpötilan muutos Δt (°C)	Cu-putken pituuden muutos Δl (mm)
21,0	0	0
34,2	14,2	0,2
42,9	21,9	0,3
66,1	45,1	0,7
83,8	65,8	1,0
100,0	79,0	1,3

Ratkaisu

a) Kuvaajasta huomataan, että putkien pituus muuttuu lämpötilan muuttuessa siten, että mittauspisteet asettuvat likimain suoralle. Pituuden muutosta voidaan siten kuvata mallilla $\Delta l = \text{vakio} \cdot \Delta t$. Lisäksi nähdään, että alumiinitangon pituuden muutos on suurempi kuin kuparitangon, kun lämpötila muuttuu saman verran.



b) $l_0 = 950$ mm, $\alpha = ?$

Taulukkolaskentaohjelmalla laskettiin valmiiksi suorien fysikaaliset kulmakertoimet. Tätä tietoa tarvitaan, koska pituus muuttuu yhtälön $\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$ mukaisesti (vertaa: $y = kx$). Suoran fysikaalinen kulmakerroin vastaa termiä αl_0, jossa α on pituuden lämpötilakerroin ja l_0 putken alkuperäinen pituus. Kuparitangolle saadaan mittausten perusteella yhtälö $\alpha l_0 = 0{,}016 \frac{\text{mm}}{\text{°C}}$, josta ratkaistaan α eli kysytty pituuden lämpötilakerroin:

$$\alpha = \frac{0{,}016 \frac{\text{mm}}{\text{°C}}}{l_0} = \frac{0{,}016 \frac{\text{mm}}{\text{°C}}}{950\,\text{mm}} = 1{,}684 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{°C}}$$

$$\approx 17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{°C}}$$

Vastaus

a) Metallien lämpötilariippuvuus on erilainen, alumiini laajenee enemmän.

b) Kuparin pituuden lämpötilakertoimen arvo on $17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{°C}}$.

Esimerkki 4 — Tilavuuden lämpölaajeneminen

Teräksisen öljyastian tilavuus on 220 l. Astia täytettiin öljyllä ääriään myöten aikaisin aamulla, jolloin lämpötila oli 4,0 °C. Kuinka paljon öljyä valui yli, kun astian lämpötila kohosi iltapäivällä Auringon paisteessa 18,0 °C:seen? Öljyn tilavuuden lämpötilakerroin on $0{,}899 \cdot 10^{-3}\,\frac{1}{°C}$.

Ratkaisu

$V_0 = 220$ l, $t_0 = 4{,}0$ °C , $t = 18$ °C, $\gamma_{\text{öljy}} = 0{,}899 \cdot 10^{-3}$,
$\alpha_{\text{teräs}} = 12{,}0 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°C}$.

Astian ja öljyn tilavuus aamulla on $V_0 = 220$ l, ja lämpötilan muutos päivällä on $\Delta t = 18\,°C - 4{,}0\,°C = 14\,°C$. Sekä astian että öljyn tilavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Öljyn tilavuuden lämpötilakerroin on $\gamma_{\text{öljy}} = 0{,}899 \cdot 10^{-3}\,\frac{1}{°C}$. Koska teräksen pituuden lämpötilakerroin $\alpha_{\text{teräs}} = 12{,}0 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°C}$, teräsastian tilavuuden lämpötilakerroin on

$$\gamma_{\text{astia}} = 3\alpha$$
$$= 3 \cdot 12{,}0 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°C} = 36 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°C}.$$

Öljyn tilavuus kasvaa määrällä

$$\Delta V_{\text{öljy}} = \gamma_{\text{öljy}} V_0 \Delta t$$
$$= 0{,}899 \cdot 10^{-3}\,\frac{1}{°C} \cdot 220\text{ l} \cdot 14\text{ °C}$$
$$= 2{,}7689\text{ l}.$$

Säiliön tilavuus kasvaa määrällä

$$\Delta V_{\text{astia}} = \gamma_{\text{astia}} V_0 \Delta t$$
$$= 36 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{°C} \cdot 220\text{ l} \cdot 14\text{ °C}$$
$$= 0{,}1109\text{ l}.$$

Öljyn ja astian tilavuuden muutosten ero on

$2{,}7689\text{ l} - 0{,}1109\text{ l} = 2{,}6580\text{ l} \approx 2{,}7\text{ l}$.

Vastaus

Öljyä vuotaa yli noin 2,7 l.

Tiivistelmä

- Lämpö siirtyy kolmella tavalla.
- Lämpö siirtyy johtumalla aineessa.
- Lämpö siirtyy myös kuljettumalla ja säteilemällä.
- Pituus muuttuu lämpötilan muuttuessa.
- Pinta-ala ja tilavuus muuttuvat lämpötilan muuttuessa.
- Veden lämpölaajeneminen poikkeaa muista nesteistä.
- Lämpölaajeneminen on huomioitava rakentamisessa.
- Lämpölaajeneminen selitetään mikromallin avulla.

Perustehtävät

66. Sinun on mitattava pituushyppykilpailun hyppyjen pituudet mahdollisimman tarkasti. Käytössäsi on raudasta ja alumiinista valmistetut mitat. Vastaa ja perustele, kumman mitoista valitset.

67. Eläinten turkit koostuvat karvoista, jotka ovat onttoja tai umpinaisia. Kumpi karvatyyppi sopii alueelle, jossa on talvella kova pakkanen? Perustele vastauksesi.

68. Miksi maa routaantuu syvälle sellaisina talvina, jolloin lumi sataa maahan vasta pakkasjakson jälkeen?

69. Selvitä, mitä tarkoitetaan kaksoismetallilla ja kuinka se toimii. Missä kaksoismetallia käytetään hyväksi?

70. Kupariputken pituus on 12,34 m, kun sen lämpötila on 19,4 °C. Kuinka paljon putken pituus kasvaa, kun putki lämmitetään lämpötilaan 221,1 °C? Esim. 2

71. Kuinka paljon 17,45 metrin pituisen rautatangon lämpötilaa on nostettava, että sen pituus kasvaa 5,3 mm? Esim. 2

72. Alumiinilevyssä on pyöreä reikä, jonka halkaisija on 2,725 cm lämpötilassa 0,00 °C. Mikä on reiän halkaisija, kun levyn lämpötila nostetaan 100,0 °C:seen? Esim. 2

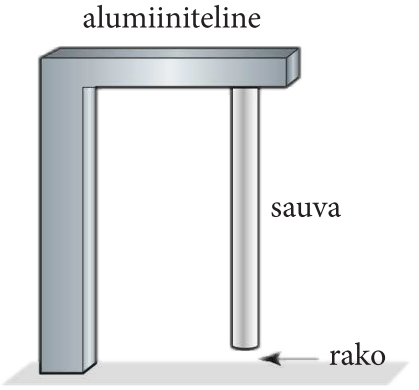
73. Suunnittele koejärjestely, jolla testaat kotona erilaisten kattiloitten paremmuutta veden keittämisessä. Millaisia asioita pitää testata? Miten kannattaa toimia, jotta tutkimus on mahdollisimman luotettava?

Soveltavat tehtävät

74. Sauva riippuu kuvan osoittamalla tavalla alumiinikehikosta. Tietyssä lämpötilassa sauvan ja lattian välissä on pieni rako. Kehystä ja sauvaa lämmitetään niin, että molempien lämpötilat muuttuvat yhtä paljon. Selitä, koskettaako sauva lattiaan lämmityksen jälkeen, jos sauva on

a) alumiinia

b) lyijyä.



75. Terässormus on lämpimämpi kuin messinkisylinteri. Sormus sopii tiukasti sylinterin ympärille. Lähteekö sormus irti sylinteristä, kun lämpötilat tasoittuvat?

76. Määritä alumiinin pituuden lämpötilakertoimen arvo. Käytä apunasi esimerkin 2 mittaustuloksia.

77. Onton rautasylinterin sisähalkaisija on 80,00 mm ja sen sisällä olevan umpinaisen alumiinisylinterin halkaisija 79,80 mm, kun lämpötila on 20 °C. Missä lämpötilassa alumiinisylinteri juuttuu kiinni, kun sylintereitä lämmitetään? (Yo syksy 1988 teht. 2)

78. Kun kolikon lämpötila nousee 98 °C, niin sen halkaisija kasvaa 0,18 %.

a) Kuinka paljon kolikon massa kasvaa?

b) Entä pinta-ala?

c) Laske pituuden lämpötilakerroin kolikon raaka-aineelle. Mitä materiaalia kolikko voisi olla?

79. Pekka halusi testata, miten lämpötilan muutos vaikuttaa öljyn laajenemiseen. Mikä seuraavista on paras koejärjestely?

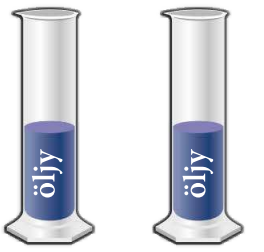
a)

$\Delta t = 10$ °C

b)

$\Delta t = 10$ °C

c)



$\Delta t = 10$ °C $\quad \Delta t = 20$ °C

80. Teräksinen mittanauha näyttää lukeman oikein, kun lämpötila on 20 °C. Mittanauhalla tehdään mittaus talvella, kun pakkasta on −25 °C. Nauha näyttää mitattavan kohteen pituudeksi 15,00 m. Kuinka pitkä mitattava kohde on todellisuudessa?

81. Pituuden lämpölaajenemista tutkittaessa mitattiin metalliputken venymä lämpötilan muuttuessa. Putken alkuperäinen pituus oli 1,0 m ja lämpötila mittauksen alussa 20 °C. Mittaustulokset on esitetty alla olevassa taulukossa.

Venymä (mm)	0,23	0,46	0,70	0,93	1,20
Lämpötila (°C)	30	40	50	60	70

a) Piirrä mittaustuloksista kuvaaja.

b) Määritä suoran kulmakerroin.

c) Selvitä kulmakertoimen avulla mitä metallia tutkittava putki oli.

82. Suunnittele koejärjestely, jolla voisit määrittää ruokaöljyn tilavuuden lämpötilakertoimen arvon.

6 Voima aiheuttaa paineen

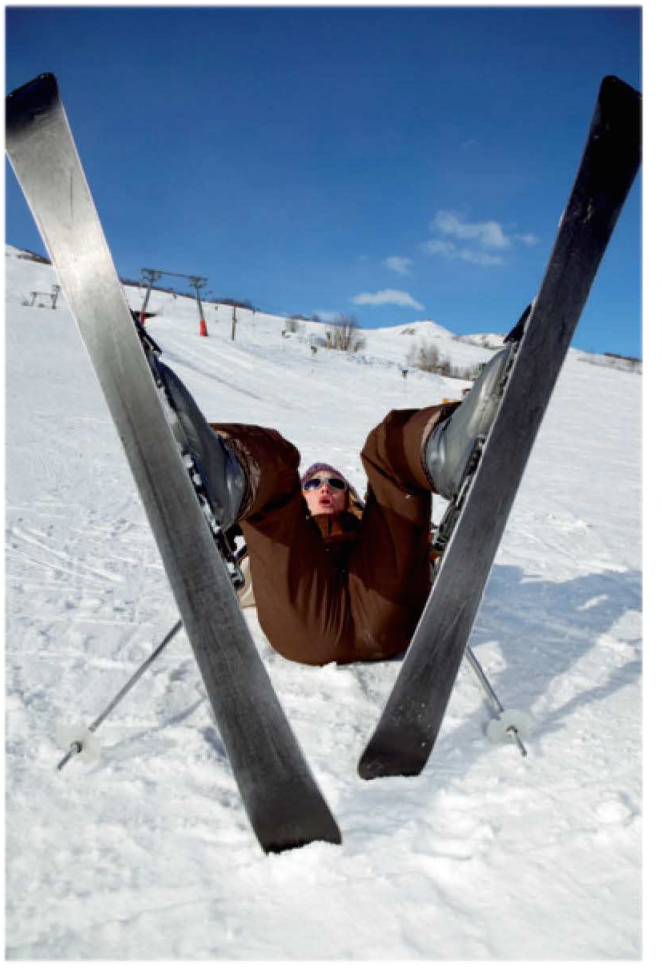
Voiman vaikutuspinta-alalla on merkitystä

On paljon tilanteita, joissa on tärkeä tietää, kuinka voima jakautuu vaikuttavalle pinnalle. Lumisessa metsässä sukset helpottavat liikkumista, koska ne jakavat hiihtäjän kinokseen kohdistaman voiman suurelle alueelle. Hiihtokenkien pohjan pinta-ala on vain murto-osa suksien pohjan alasta, ja siksi ilman suksia liikkuvan kävelijän kinokseen kohdistama voima jakautuu hyvin pienelle alalle. Kinoksen pinta ei tällöin kestä, ja kävelijä uppoaa hankeen.

Paine kuvaa myös nesteen ja kaasun astian seinämiin aiheuttamaa puristusta. Spraypulloja ei saa viedä tilaan, jonka lämpötila on yli 50 °C. Kaasun paine saattaa räjäyttää kuumenneen spraypullon.

Balettitanssijan varpaat ovat kovilla esityksen aikana. Vaikka ballerina olisi kevyt, lattian tukivoima jakautuu kärkitossuilla tanssittaessa hyvin pienelle alalle ja varpaiden kärkiin vaikuttaa valtava paine.

Spraypulloja ei saa viedä lämpimään saunaan.



Suksen pinta-ala on moninkertainen verrattuna kengän pohjan pinta-alaan. Sukset helpottavat liikkumista lumihangessa.

Paine

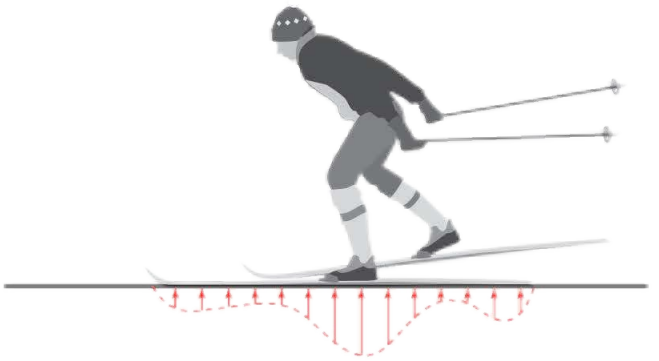
Paine p määritellään siten, että

$$p = \frac{F}{A},$$

jossa

F on pintaan kohdistuva kohtisuora voima ja

A on voiman vaikutuspinnan pinta-ala.



Sukseen kohdistuvan tukivoiman jakautuminen suksen pituudelle riippuu suksen jäykkyysominaisuuksista ja on eri tarkoituksiin suunnitelluilla suksilla erilainen.

Paineen yksikkö

$$[p] = \frac{[F]}{[A]} = 1\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = 1\ \mathrm{Pa}$$

Jos pöydälle, jonka kannen pinta-ala on 1 m², kaataa yhden desilitran riisejä, aiheuttavat riisit kanteen noin yhden pascalin kuormituksen.

Normaali-ilmanpaine

p_0 = 101 325 Pa = 1 013,25 hPa
= 1 013,25 mbar = 1,01325 bar

Paine kuvaa voiman jakautumista vaikutuspinnalle

Suure, joka kuvaa voiman jakautumista voiman vaikutuspinnalla, on **paine**. Paineen suuruus saadaan jakamalla pintaan vaikuttava voima vaikutuspinnan pinta-alalla, $p = \frac{F}{A}$. Paineella ei ole suuntaa, vaikka voimalla on suunta. Paineeseen liittyvä voima on aina kohtisuorassa vaikutuspintaa vastaan.

Voiman jakautumista kiinteälle pinnalle sanotaan myös **kuormitukseksi.** Voima ei kiinteiden aineiden kosketuksessa yleensä jakaudu tasaisesti. Esimerkiksi lumihangella hiihdettäessä suksien päissä vaikuttaa pinta-alayksikköä kohti erisuuruinen voima kuin suksen keskellä.

Kiinteiden kappaleiden pintojen välisessä vuorovaikutuksessa paine kuvaa vain tilannetta rajapinnalla. Se, miten voima vaikuttaa pintaa syvemmälle, riippuu aineen lujuusominaisuuksista.

Paineen yksikkö on pascal

Paineen yksikkö SI-järjestelmässä on pascal (Pa). Pascal on suhteellisen pieni yksikkö. Säätiedotuksissa ilmanpaineen yksikkönä käytetään pascalin monikertaa hehtopascalia, hPa.

Paine on suure, jota tarvitaan monilla fysiikan, lääketieteen ja tekniikan osa-alueilla. Eri sovellusalueilla paineen mittaamiseen käytetään monia muitakin yksiköitä kuin pascalia. Esimerkiksi lääketieteessä käytetään elohopeamillimetriä ja huoltokorjaamoissa ilmakehää.

Usein paine ilmaistaan **ylipaineena** tai **alipaineena**. Ne kertovat, kuinka paljon suurempi tai pienempi paine on verrattuna ulkopuolella vallitsevaan paineeseen. Esimerkiksi auton renkaiden paine on ylipaine. Auton renkaan paine 2,1 atm tarkoittaa, että renkaan sisällä olevan ilman paine on 2,1 ilmakehää suurempi kuin renkaan ulkopuolisen ilman paine. Autonrenkaan sisällä oleva paine eli niin sanottu absoluuttinen paine on tällöin 2,1 atm + 1,0 atm = 3,1 atm.

Painetta käsitellään usein suureena, joka kuvaa jonkin voiman jakautumista pinnalle. Paine on käyttökelpoinen myös lämpöopissa, sillä paine on yksi termodynaamisen systeemin tilaa kuvaavista suureista.

Paineen muita yksiköitä			
ilmakehä	atm	1 atm	101 325 Pa
baari	bar	1 bar	100 000 Pa
elohopea-millimetri	mmHg	760 mmHg	1 atm

Pascalin laki
Ulkoinen paine leviää tasaisesti kaikkialle nesteeseen.

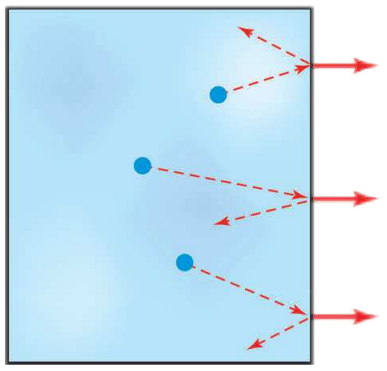
Paineen suuruus ei riipu mittaussuunnasta.

Ulkoinen paine leviää tasaisesti nesteissä ja kaasuissa

Kun vedellä täytetyn lääkeruiskun mäntää painetaan, veteen kohdistuu voima, joka jakautuu männän pinnan suuruiselle alalle. Voima aiheuttaa veteen paineen. Vedessä ja muissa nesteissä paine ei rajoitu ainoastaan pintaan vaan leviää kaikkialle nesteeseen. Tätä nesteiden ominaisuutta käytetään voiman vaikutuksen siirtämiseen. Esimerkiksi autojen jarruissa jarrupolkimen liike välitetään nesteen avulla jarrukenkiin.

Myös kaasuissa ulkoinen paine jakautuu tasaisesti samaan tapaan kuin nesteissä. Kaasujen ja nesteiden käyttäytyminen eroaa kuitenkin merkittävästi toisistaan niin, että kaasuja on helppo puristaa kokoon, nesteitä taas ei. Käytännössä nesteet ovat likimain kokoonpuristumattomia.

Paineen tasaisesta leviämisestä seuraa, että termodynaamisessa systeemissä paine-erot pyrkivät häviämään. Jos lääkeruisku on yhdistetty letkulla johonkin säiliöön, paine kasvaa myös säiliössä olevassa nesteessä, kun lääkeruiskun mäntää työnnetään. Myös tuulet aiheutuvat paine-erojen tasaantumisesta. Ilma virtaa korkeapaineen alueelta matalapaineen alueelle.



Aineen rakenneosat kohdistavat astian seinään voiman, kun ne törmäävät seinään. Paine aiheutuu tästä voimasta.

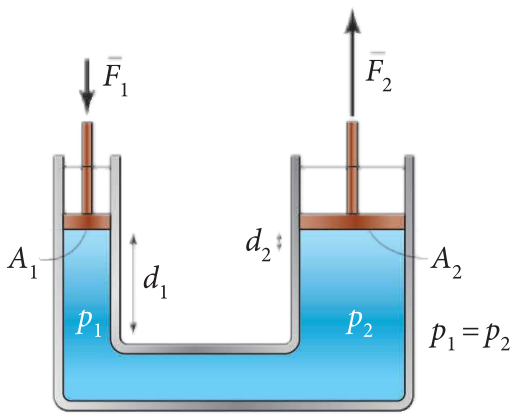
Paineen mikromalli
Nesteissä ja kaasuissa paine aiheutuu aineen rakenneosasten liikkeestä. Kun rakenneosat törmäilevät astian seinämiin, ne kohdistavat seinämiin voiman, joka aiheuttaa paineen.

Mikromalli selittää nesteiden ja kaasujen paineen ominaisuudet

Nesteiden ja kaasujen paine voidaan selittää tarkastelemalla aineen rakennetta atomitasolla. Nesteissä ja kaasuissa aineen rakenneosat eli atomit ja molekyylit pääsevät liikkumaan toistensa lomitse suhteellisen vapaasti. Kun neste- tai kaasumolekyylit törmäävät astian seinään, ne ovat vuorovaikutuksessa seinän kanssa ja niistä jokainen kohdistaa seinään voiman.

Törmäysten yhteisvaikutus eli summavoima tietylle pinta-alalle aiheuttaa paineen. Pienellekin alalle törmäyksiä tapahtuu lyhyessä ajassa valtava määrä. Esimerkiksi jos vesi on huoneenlämpöistä, osuu astian neliösenttimetrin suuruiselle alalle sekunnissa noin 10^{25} vesimolekyyliä.

Mitä korkeampi nesteen tai kaasun lämpötila on, sitä nopeammin atomit ja molekyylit liikkuvat. Siksi atomin tai molekyylin törmäyksestä astian seinään seuraa suurempi voima. Myös törmäysten lukumäärä aikayksikössä kasvaa, kun aineen lämpötila nousee. Siten lämpötilan noustessa sekä nesteen että kaasun paine yleensä kasvaa.



Jos hydraulisessa laitteessa männät eivät ole yhtä suuret, suurempaan mäntään kohdistuva voima on suurempi kuin voima, jolla pientä mäntää painetaan. Suurempi mäntä liikkuu lyhyemmän matkan kuin pieni mäntä.

Hydraulisen laitteen tasapainoehto

$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$, jossa

F_1 on voima, jolla mäntää 1 painetaan,

F_2 on mäntään 2 vaikuttava voima,

A_1 ja A_2 ovat mäntien pinta-alat.

Hydrauliikassa voima välittyy nesteen avulla

Paineen leviämistä tasaisesti nesteessä käytetään hyväksi **hydrauliikassa**. Hydrauliikalla tarkoitetaan voiman välittämistä nesteen avulla. Nesteenä käytetään yleensä öljyä. Hydraulisilla järjestelmillä ohjataan esimerkiksi kaivinkoneen kauhojen liikkeitä tai välitetään henkilöauton jarrupolkimeen kohdistettu voima pyörissä oleviin jarruihin.

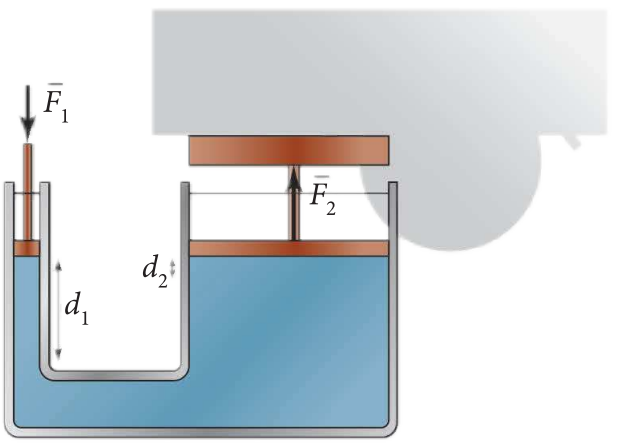
Hydrauliikan perusidea on, että kun kokoonpuristumattomaan nesteeseen kohdistetaan voima jostakin kohdasta, paine nousee kaikkialla nesteessä Pascalin lain mukaisesti.

Hydraulisilla järjestelmillä voidaan muuttaa myös voiman suuruutta. Tätä käytetään hyväksi muun muassa hydraulisissa nostureissa. Voiman suuruuden muuttaminen perustuu siihen, että paineeseen liittyvä voima on suoraan verrannollinen vaikutuspinta-alaan.

Tarkastellaan tilannetta, jossa männät ovat erisuuruiset. Merkitään pienemmän männän pinta-alaa tunnuksella A_1 ja suuremman pinta-alaa tunnuksella A_2, ja voimia vastaavasti tunnuksilla F_1 ja F_2. Kun pienempää mäntää työnnetään voimalla F_1, se aiheuttaa nesteeseen paineen $p_1 = \frac{F_1}{A_1}$. Paine leviää nesteessä tasaisesti, joten suuren männän luona vallitsee sama paine eli $p_1 = p_2$, eli $\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$. Täten $F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1$. Suurempaan mäntään kohdistuu suurempi voima kuin pienempään.

Esimerkki 1 — Hydraulinen nosturi

Hydraulisen nosturin suuremman männän poikkipinta-ala on 55-kertainen pienemmän männän poikkipinta-alaan verrattuna. Kuinka suuri voima tarvitaan, kun nosturilla nostetaan tasaisesti autoa, jonka massa on 1 200 kg? Nosturin männät ovat herkkäliikkeisiä.



Ratkaisu

$m = 1\,200$ kg, $\frac{A_2}{A_1} = \frac{55}{1}$, $F_1 = ?$

Auton massa $m = 1\,200$ kg, joten auton nostamiseen tasaisesti tarvitaan voima

$$F_2 = G = mg = 1200 \text{ kg} \cdot 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1{,}1772 \cdot 10^4 \text{ N}.$$

Merkitään pienemmän männän pinta-alaa tunnuksella A_1 ja suuremman pinta-alaa tunnuksella A_2 ja voimia vastaavasti tunnuksilla F_1 ja F_2. Kun pienempää mäntää työnnetään voimalla F_1, se aiheuttaa nesteeseen paineen

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1}.$$

Paine leviää nesteessä tasaisesti, joten suuren männän luona vallitsee sama paine eli

$$p_1 = p_2 \text{ eli } \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}.$$

Ratkaistaan kysytty voima ja sijoitetaan tunnetut arvot:

$$F_1 = \frac{A_1}{A_2} F_2 = \frac{1}{55} \cdot 11\,722 \text{ N} = 214{,}0364 \text{ N} \approx 210 \text{ N}.$$

Vastaus

Nostamiseen tarvitaan voima, jonka suuruus on 210 N.

Esimerkki 2 — Paineen laskeminen

Sirkustaiteilija kävelee puujaloilla, joiden poikkipinta-ala on 4,0 cm². Eräässä esityksen kohdassa taiteilija seisoo yhden puujalan varassa. Kuinka suuri paine jalan alla on, kun taiteilijan ja puujalkojen yhteinen massa on 97 kg? Vertaa painetta normaali-ilmanpaineeseen.

Ratkaisu

$m = 97\ \text{kg}$, $A = 0{,}00040\ \text{m}^2$, $p = ?$

Taiteilijan ja puujalkojen yhteinen paino

$$G = mg = 97\ \text{kg} \cdot 9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 951{,}57\ \text{N}.$$

Paine puujalan alla on $p = \frac{G}{A}$, jossa paino G on puristava voima, ja A on pinta-ala, jolle puristava voima jakautuu. Sijoitetaan tunnetut arvot:

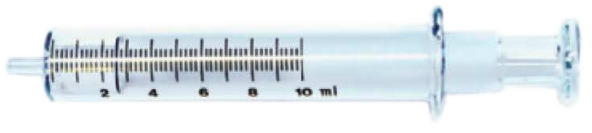
$$p = \frac{G}{A} = \frac{951{,}57\ \text{N}}{0{,}00040\ \text{m}^2} = 2{,}3789 \cdot 10^6\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 2{,}4\ \text{MPa}.$$

Vastaus

Paine puujalan alla on 2,4 MPa. Ilmanpaine on noin 0,1 MPa, joten paine puujalan alla on noin 24-kertainen ilmanpaineeseen verrattuna.

Esimerkki 3 — Paineen leviäminen veteen

Lääkeruiskun männän halkaisija on 12 mm. Kuinka suuren paineen mäntä aiheuttaa ruiskussa olevaan veteen, kun mäntää työnnetään 7,5 N:n voimalla?



Huomaa!

Tulokseksi saatu paine on vedessä vallitseva ylipaine, jonka suuruus voidaan laskea yksinkertaisesti paineen määritelmän mukaisesti. Kun vettä ei puristeta, paine vedessä on sama kuin paine ruiskun ulkopuolella.

Ratkaisu

$d = 12\ \text{mm}$, $F = 7{,}5\ \text{N}$, $p = ?$

Puristus aiheuttaa veteen paineen $p = \frac{F}{A}$, jossa F on puristava voima ja A on pinta-ala, jolle puristava voima jakautuu.

Männän pinta-ala on $A = \pi r^2$, jossa männän säde on

$$r = \frac{12\ \text{mm}}{2} = 6\ \text{mm}.$$

Puristus aiheuttaa siten veteen paineen

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi r^2}$$

$$= \frac{7{,}5\ \text{N}}{\pi \cdot (0{,}006\ \text{m})^2} = \frac{7{,}5\ \text{N}}{1{,}1310 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2}$$

$$= 6{,}6315 \cdot 10^4\ \text{Pa} \approx 66\ \text{kPa}.$$

Vastaus

Männän puristus aiheuttaa veteen paineen 66 kPa.

Tiivistelmä

- Voiman vaikutuspinta-alalla on merkitystä.
- Paine kuvaa voiman jakautumista vaikutuspinnalle.
- Paineen yksikkö on pascal.
- Ulkoinen paine leviää tasaisesti nesteissä ja kaasuissa.
- Hydrauliikassa voima välittyy nesteen avulla.
- Mikromalli selittää paineen ominaisuudet.

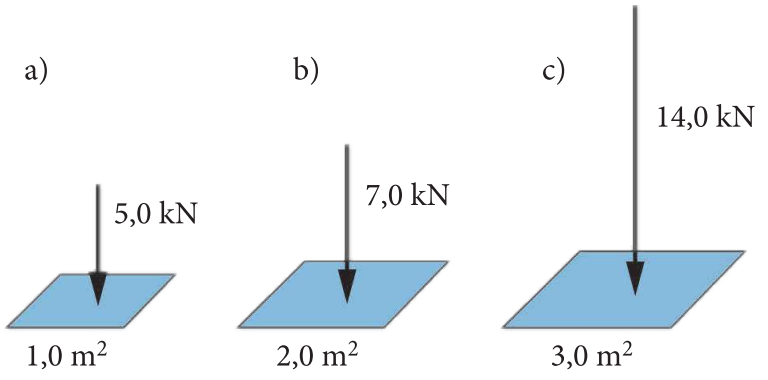
Perustehtävät

83. Mitä suureita on mitattava, kun halutaan mitata kirjan pöydän pintaan aiheuttama paine? Esim. 2

84. Miksi avannosta pelastautuneen kannattaa ryömiä tai pyöriä etäälle avannosta ennen kuin hän nousee kävelemään? Esim. 2

85. Miksi fakiiri voi maata piikkivuoteella satuttamatta itseään? Miksi piikkivuoteelle asettuminen ja siltä nouseminen ovat tempun vaikeimmat kohdat? Esim. 2

86. Missä kuvien tilanteista paine on suurin? Esim. 2



87. Täydennä taulukko, kun paine on vakio.

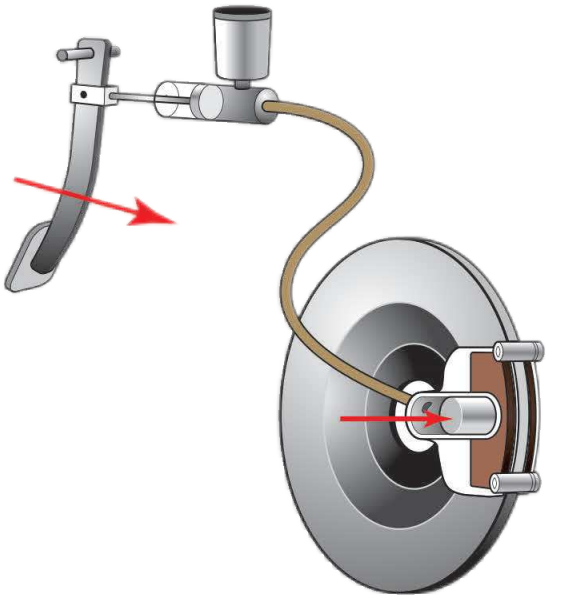
Voima (N)	15	30		55
Pinta-ala (m^2)	0,3		0,9	

88. Kuinka suuren paineen aiheuttaa 122 N:n voima, joka kohdistuu 0,187 m^2:n suuruiselle alalle? Esim. 2 ja 3

89. Henkilö, jonka massa on 62 kg, seisoo kengänkantojen varassa. Kuinka suuren paineen hän aiheuttaa kengänkantojen alle, kun kantojen yhteinen pinta-ala on 2,4 cm^2? Esim. 2

90. Kuinka suuri voima kohdistuu 1,00 cm^2:n suuruiselle alalle kaasusäiliössä, jossa vallitsee 1,25 MPa:n paine?

91. Selitä hydraulisen jarrun tehtävä.



Soveltavat tehtävät

92. Pöydän jalan ja lattian välisen kosketuspinnan koko on 4,0 cm × 4,0 cm. Kuinka suuren paineen pöydän neljä jalkaa aiheuttavat alla olevan lattian pintaan, jos pöydän paino jakautuu tasaisesti kaikille jaloille? Pöydän massa on 15,5 kg.

93. Nousevan lentokoneen matkustamossa paine laskee arvosta 1 010 hPa arvoon 720 hPa. Kuinka suuri paine-erosta johtuva voima kohdistuu nuhaisen matkustajan tärykalvoon, kun paine sisäkorvassa ei pääse tasaantumaan? Tärykalvon pinta-ala on 0,60 cm^2.

94. Hydraulisen nosturin suuremman männän poikkipinta-ala on 45-kertainen pienemmän männän poikkipinta-alaan verrattuna, $A_2 = 45\ A_1$. Kuinka raskaan esineen nosturi nostaa, kun pienempään mäntään kohdistuu 280 N:n suuruinen voima? Nosturin männät ovat herkkäliikkeisiä.

95. Lääkeruiskussa olevan ilman paine on aluksi 101 kPa. Ruiskussa olevaa ilmaa puristetaan kasaan painamalla mäntää 25 N:n voimalla. Männän halkaisija on 1,4 cm. Kuinka suuri ylipaine ja kuinka suuri absoluuttinen paine ruiskussa olevassa ilmassa vallitsee?

96. Samppanjapulloa avattaessa pitää olla hyvin varovainen. Samppanjapullon sisällä korkeassa paineessa oleva hiilidioksidi työntää korkkia suurella voimalla ja irtoava korkki voi saada suuren nopeuden.

a) Kuinka suuri voima kohdistuu pullon korkin alapintaan, kun sen halkaisija on 2,0 cm ja kun pullossa vallitseva ylipaine on 5,5 bar?

b) Kuinka suuren kiihtyvyyden korkki saa, jos sen massa on 12 g ja jos korkin ja pullon suun välinen kitka oletetaan merkityksettömäksi?

97. Auton jarrujärjestelmän pääsylinterin halkaisija on 2,0 cm ja jarrusylinterien halkaisija 8,0 cm. Kuinka suurella voimalla jarrupalat painautuvat jarrulevyjä vasten, jos pääsylinterin mäntään kohdistuva voima on 110 N?

98. Silmänpaine on silmän sisällä vallitsevan ylipaineen suuruus. Silmälääkäri mittaa potilaan silmänpaineen arvoksi 12 mmHg. Kuinka suuri ylipaine on pascaleina?

99. Kirja, jonka kannen korkeus on 26 cm ja leveys 19,5 cm, lojuu pöydällä. Kirjan massa on 0,32 kg.

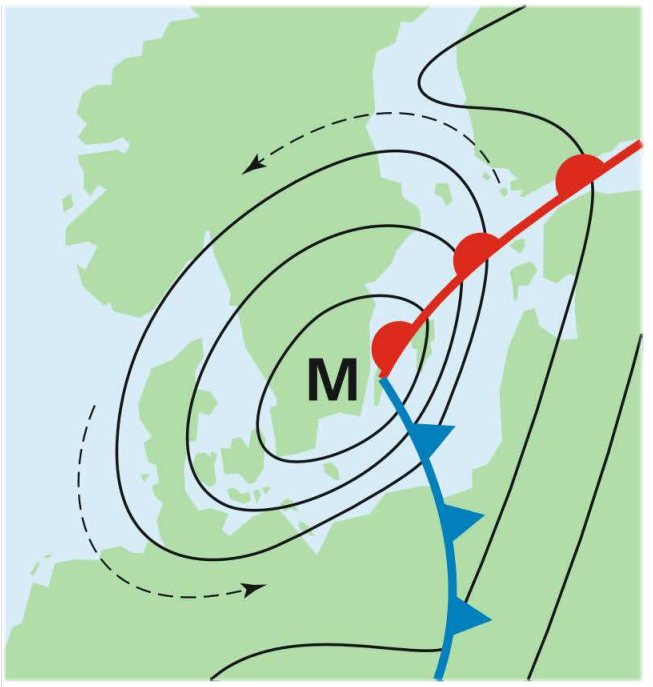
a) Kuinka suuren paineen kirja aiheuttaa pöydän pintaan?

b) Kuinka suuri voima kirjan yläpintaan kohdistuu 101 325 Pa:n suuruisen ilmanpaineen vuoksi?

c) Miksi ilmanpainetta ei tarvitse ottaa huomioon a-kohdan laskussa?

100. Autokorjaamon hydraulisessa nosturissa pumppumännän poikkipinta-ala on 0,025 m^2 ja kuormamännän poikkipinta-ala 0,21 m^2. Kuinka suuri paine pumppumännän toiselle puolelle on saatava, että nosturilla voi nostaa autoa, jonka massa on 1 100 kg?

7 Aineen oma paino aiheuttaa paineen



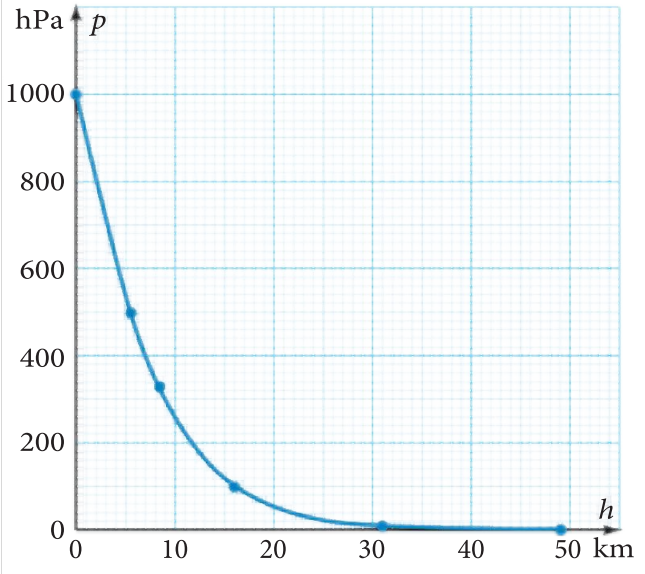
Pohjoisella pallonpuoliskolla ilmavirtaus kiertää matalapaineen keskusta vastapäivään. Kuvassa olevat käyrät ovat isobaareja. Samalla käyrällä vallitsee sama ilmanpaine. Pilkkuviivalla on merkitty tuulensuunta.

Ilmanpaine aiheutuu ilman omasta painosta

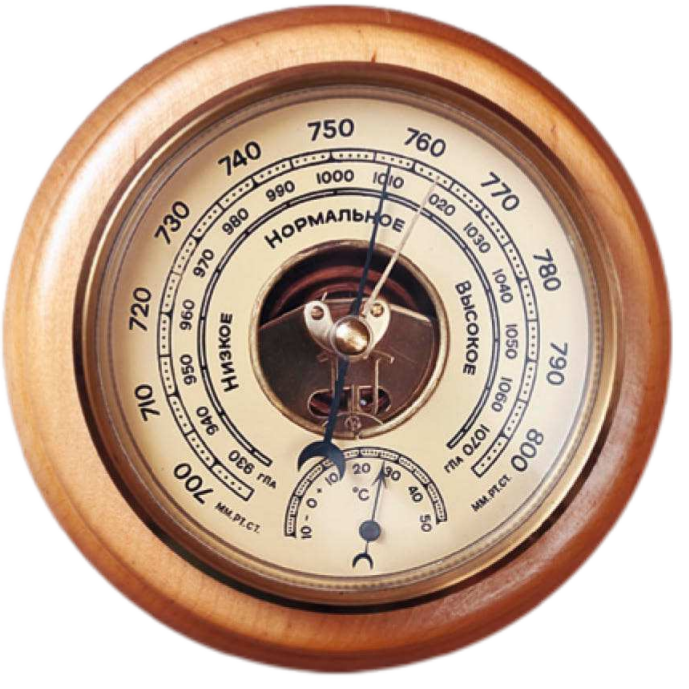
Ilmakehän paine muuttuu, kun liikutaan pystysuunnassa. Maapalloa ympäröivässä ilmakehässä vallitsee merenpinnan tasolla 101 325 Pa:n eli noin yhden baarin paine. Tätä painetta sanotaan **ilmanpaineeksi**. Se aiheutuu ilmakehässä olevan ilman omasta painosta ja se pienenee ylöspäin siirryttäessä. Mont Blancin huipulla noin 4 800 metrin korkeudessa merenpinnasta ilmanpaine on enää noin puolet ilmanpaineesta merenpinnan tasolla olevasta ilmanpaineesta.

Meteorologiassa nykyisin käytettävä ilmanpaineen yksikkö hehtopascal (hPa) on yhtä suuri kuin ennen käytetty yksikkö millibaari (mbar). Ilmanpaine vaihtelee välillä 950…1 060 hPa, ja pitkän aikavälin keskiarvoa 1 013,25 hPa sanotaan **normaali-ilmanpaineeksi**. Yksi ilmakehä (atm) on yhtä suuri kuin tämä normaali-ilmanpaine.

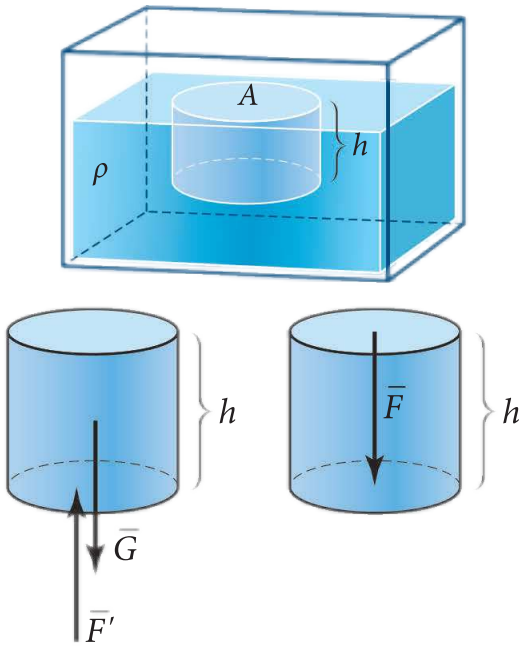
Kun ilmanpaineet merkitään kartalle, saadaan ilmanpainekartta, jossa näkyvät muun muassa matalapaineiden ja korkeapaineiden keskukset. Tuulet syntyvät, kun ilma liikkuu korkeapaineen alueelta matalapaineen alueelle. Maan pyörimisen vuoksi ilma ei kuitenkaan virtaa suoraan kohti matalapaineen aluetta, vaan tuulet kiertävät matalapaineen keskuksen ympäri pohjoisella pallonpuoliskolla vastapäivään ja eteläisellä pallonpuoliskolla myötäpäivään.



Ilmanpaine pienenee siirryttäessä ylöspäin ilmakehässä.



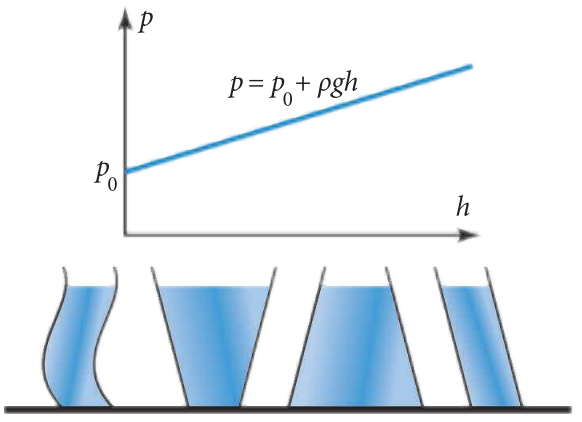
Normaali-ilmanpaine on noin 1010 hPa.



Nestekappale on tasapainossa, joten sen alla oleva neste kohdistaa nestekappaleeseen voiman $\bar{F}'$, joka on yhtä suuri kuin sen paino. Siten Newtonin III lain mukaisesti nestekappale kohdistaa allaan olevaan nestepintaan voiman $\bar{F}$.

Hydrostaattinen paine
Nesteessä syvyydellä h vallitsee hydrostaattinen paine $p_h = \rho hg$, jossa
ρ on nesteen tiheys,
g on putoamiskiihtyvyys ja
h on tarkastelusyvyys.

Kokonaispaine nesteessä
Nesteessä syvyydellä h vallitseva kokonaispaine on $p = p_0 + p_h$, jossa
p_0 on ilmanpaine ja
p_h on hydrostaattinen paine.



Hydrostaattisen paineen arvo tietyssä nesteessä riippuu vain siitä, kuinka paljon tarkastelukohtaa korkeammalla nesteen pinta on. Paine ei riipu millään tavalla astian muodosta eikä pohjan pinta-alasta.

Hydrostaattinen paine aiheutuu nesteen omasta painosta

Nesteeseen paineen aiheuttaa nesteen oma paino. Paine on sitä suurempi, mitä syvemmällä nesteessä ollaan. Tätä painetta sanotaan **hydrostaattiseksi paineeksi** p_h.

Nesteessä syvyydellä h vallitsevan hydrostaattisen paineen lauseke voidaan johtaa tarkastelemalla kuvan esittämää pystyseinäistä ”nestekappaletta”, jonka korkeus on h ja pohjan pinta-ala A. Nestekappaleen tilavuus on silloin $V = Ah$ ja massa $m = \rho V = \rho Ah$. Nestekappaleen paino on $G = mg = \rho Ahg$. Nestekappaleen pohjalla tämä voima aiheuttaa paineen määritelmän mukaan hydrostaattisen paineen $p_h = \rho hg$.

Hydrostaattinen paine on sitä suurempi, mitä suurempi nesteen tiheys on ja mitä syvemmällä painetta tarkastellaan. Samassa nesteessä paine on samalla syvyydellä kaikkialla yhtä suuri. Paineen suuruus ei riipu mittaussuunnasta.

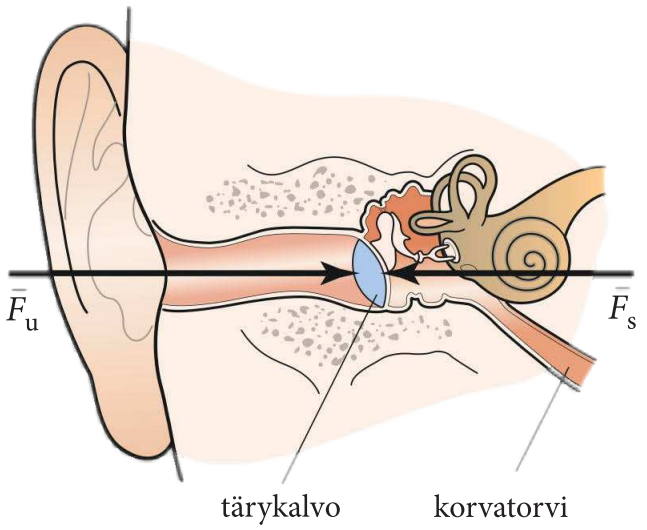
Veden tiheys on noin tuhatkertainen ilman tiheyteen verrattuna, joten vedessä paineen muutos on paljon helpompi havaita kuin ilmassa. Kaasusäiliöissä kaasun paine voi olla kymmen- tai satakertainen ilmanpaineeseen verrattuna, joten säiliön sisällä kaasun painosta johtuvat paineen erot ovat merkityksettömiä, eli paine on oleellisesti sama kaikkialla säiliössä. Nestesäiliöissä hydrostaattisella paineella sen sijaan on aina merkitystä.

Kokonaispaine nesteessä on ilmanpaineen ja hydrostaattisen paineen summa

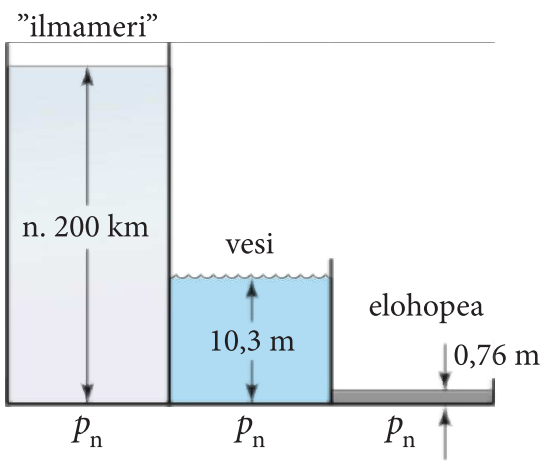
Järvissä, merissä ja avoimissa astioissa kokonaispaine tietyllä syvyydellä on hydrostaattisen paineen ja pinnalla vallitsevan ilmanpaineen summa. Yleisesti nesteessä syvyydellä h vallitseva kokonaispaine p on ulkoisen paineen p_0 ja hydrostaattisen paineen p_h summa.

Astian muoto ei vaikuta tietyllä syvyydellä olevaan paineeseen, koska kokonaispaine nesteessä riippuu ainoastaan ulkoisesta paineesta ja tarkastelusyvyydestä. Tätä ilmiötä kutsutaan **hydrostaattiseksi paradoksiksi**.

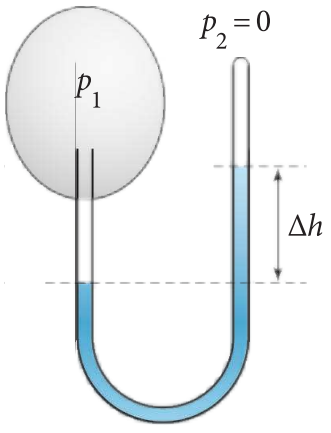
Ihminen pystyy muuttamaan keuhkoissa olevan ilman painetta laajentamalla rintakehää, mikä mahdollistaa ilman virtaamisen keuhkoihin sisäänhengityksessä ja keuhkoista pois uloshengityksessä. Hengittäminen perustuu siten paine-erojen tasoittumiseen. Keuhkopussissa on normaalihengityksessä 0,3…0,8 kPa:n alipaine. Jo muutaman kymmenen senttimetrin syvyydessä vedessä vallitseva hydrostaattinen paine on niin suuri, että ihminen ei pysty hengittämään veden pinnan yläpuolelle johdetun putken kautta.



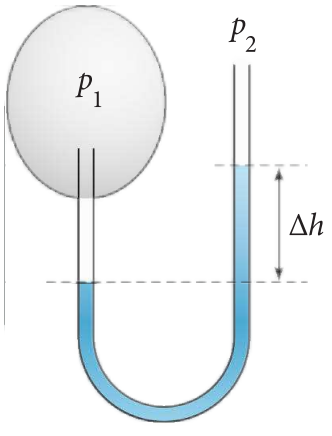
Jos ulkopuolinen paine kasvaa nopeasti ja paine korvan sisällä ei ehdi muuttua, paine-erosta johtuva voima painaa tärykalvoa sisäänpäin. Tämä aistitaan äkillisenä kipuna.



Ilmanpainetta vastaavat hydrostaattiset paineet.



Suljetussa U-putkimanometrissä toinen haara on umpinainen ja siellä on likimain tyhjiö. Umpinaisessa päässä paine on siten nolla, ja pintojen korkeusero ilmaisee suoraan säiliössä olevan kaasun paineen.
$\boldsymbol{p = \rho g \Delta h}$



Avoimessa U-putkimanometrissä toinen pää on säiliössä, jonka sisältämän kaasun paine halutaan mitata. Toinen pää on avoin, joten siinä vallitsee ympäröivän ilman paine.
$\boldsymbol{\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g \Delta h}$

Ilmanpaine havaitaan voimavaikutuksen kautta

Ilma kohdistaa ilmanpaineen vuoksi maanpinnalla oleviin kaikkiin pintoihin suuria voimia. Ilmanpaine rutistaa kuumana suljetun peltikanisterin kasaan, kun kanisteri laitetaan hanasta valuvan kylmän vesisuihkun alle. Tästä päätellen ilmanpainetta voidaan pitää suurena paineena. Ihminen ei kuitenkaan havaitse ilmanpaineeseen liittyvää voimaa, koska elimistön sisällä vallitseva paine on hyvin lähellä ilmanpainetta.

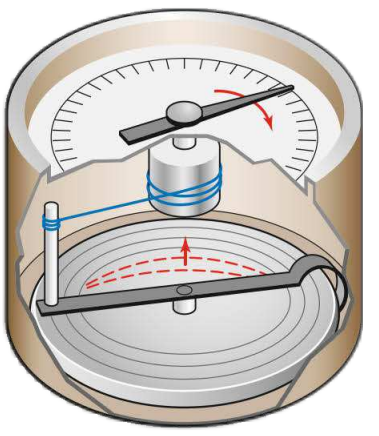
Paineen muutos havaitaan siihen liittyvän voiman kautta. Syvälle sukellettaessa tai lentokoneen nousun ja laskun aikana hytissä olevaa painetta muutetaan, jolloin ulkoiseen paineeseen liittyvä voima muuttuu. Paineen muutos havaitaan erityisesti korvien tärykalvoissa. Äkillinen paineen muutos korvan ulkopuolella saa aikaan paine-eron tärykalvon eri puolilla. Paine-erosta johtuva voima venyttää tärykalvoa. Tämä tuntuu äkillisenä kipuna korvassa. Lentokoneessa tärykalvon eri puolten välinen paine-ero häviää vähitellen, kun sisäkorvan paine saavuttaa ulkoisen paineen arvon ilman virratessa korvatorvea pitkin nenäonteloon.

Paineen mittaaminen perustuu voimavaikutukseen

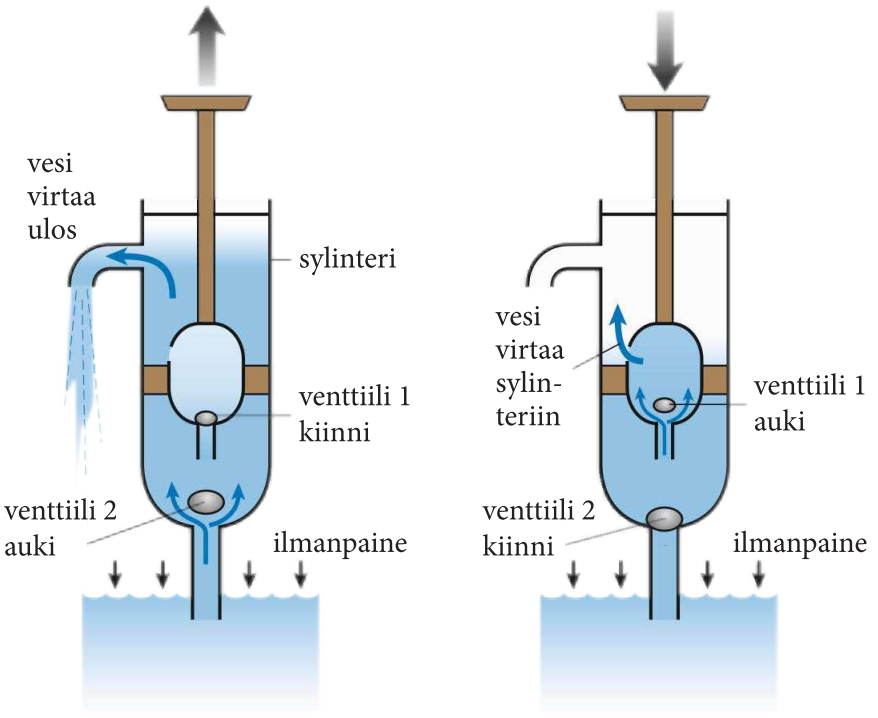
Painemittareille on yhteistä, että niiden toiminta perustuu joko suoraan tai välillisesti paineen voimavaikutukseen. U-putkimanometri on helppokäyttöinen painemittari. U-putkessa on nestettä, jonka tiheys tunnetaan. Yleisimmin käytetty neste on elohopea. Kun putken päissä on eri paineet p_1 ja p_2, saadaan paine-ero Δp selville nestepintojen korkeuseron Δh avulla. Paineiden ero on $\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g \Delta h$.

Rasiailmapuntarissa paine mitataan ilmapuntarirasian joustavan kannen muodonmuutoksen avulla. Rasian sisällä on hyvin pieni paine. Kun ulkoinen paine kasvaa, rasian kansi painuu sisäänpäin. Kannen liike välitetään vipusysteemin avulla rasian osoitinnuolen akselille.

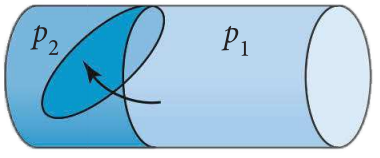
Nykyisin useimmat painemittarit ovat elektronisia. Tällaisten mittareiden toiminta perustuu siihen, että paine aiheuttaa anturissa muodonmuutoksen, jonka suuruus mitataan johonkin sähköiseen ilmiöön perustuen. Esimerkiksi verenpainemittarit ovat nykyisin elektronisia.



Rasiailmapuntarissa ulkoisesta paineesta aiheutuva voima painaa rasian herkkäliikkeistä kantta.



Ilmanpaine työntää veden kaivosta, kun imupumpun säiliön paine laskee.



Läppä avautuu, kun $p_1 > p_2$.

Pumpun venttiili aukeaa, kun paine p_2 on pienempi kuin paine p_1.

Pumpun toiminta perustuu paine-eroihin

Vettä voi pumpata kaivosta kahdella eri menetelmällä. Jos pumppu on maanpinnalla, kyseessä on imupumppu. Imupumppu toimii aivan samaan tapaan kuin mehupilli. Pumppu laskee letkun yläpäässä painetta, jolloin ilmanpaine työntää kaivossa olevan veden letkuun. Koska imupumppu perustuu ilmanpaineen työntävään vaikutukseen, vettä voi nostaa imupumpulla vain tiettyyn korkeuteen.

Toinen pumpputyyppi on uppopumppu, joka työntää veden letkuun. Uppopumppu on nimensä mukaisesti upotettu veteen, ja sen sisällä peruspaine on sama kuin ympäröivän veden paine. Pumpun läpi virtaavan veden painetta nostetaan mekaanisesti, jolloin sen paine voi nousta hyvinkin paljon. Näin vesi saadaan nostetuksi monikertaiselle korkeudelle imupumppuihin verrattuna. Uppopumpun asentaminen ja huoltaminen on tietysti paljon hankalampaa kuin imupumpun, varsinkin jos pumppu on monen kymmenen metrin syvyisen porakaivon pohjalla.

Esimerkki 1 — Hydrostaattinen paine

a) Kuinka suuri hydrostaattinen paine ja
b) kuinka suuri kokonaispaine on järvessä 4,5 metrin syvyydessä, kun ilmanpaine on 1 013 hPa?

Ratkaisu

a) $h = 4{,}5$ m, $p_h = ?$

Käytetään veden tiheydelle arvoa
$\rho = 1{,}000 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1{,}000 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, jolloin mainitussa syvyydessä hydrostaattinen paine on

$$p_h = \rho g h$$
$$= 1{,}000 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4{,}5\,\text{m}$$
$$= 44\,145\,\text{Pa} \approx 44\,\text{kPa}.$$

b) $p_0 = 1013$ hPa, $p = ?$

Kokonaispaine on

$$p = p_0 + p_h$$
$$= 101\,300\,\text{Pa} + 44\,145\,\text{Pa}$$
$$= 145\,445\,\text{Pa} \approx 145\,\text{kPa}.$$

Vastaus

4,5 metrin syvyydessä hydrostaattinen paine on 44 kPa ja kokonaispaine on 145 kPa.

Esimerkki 2 — Pascalin lain soveltaminen

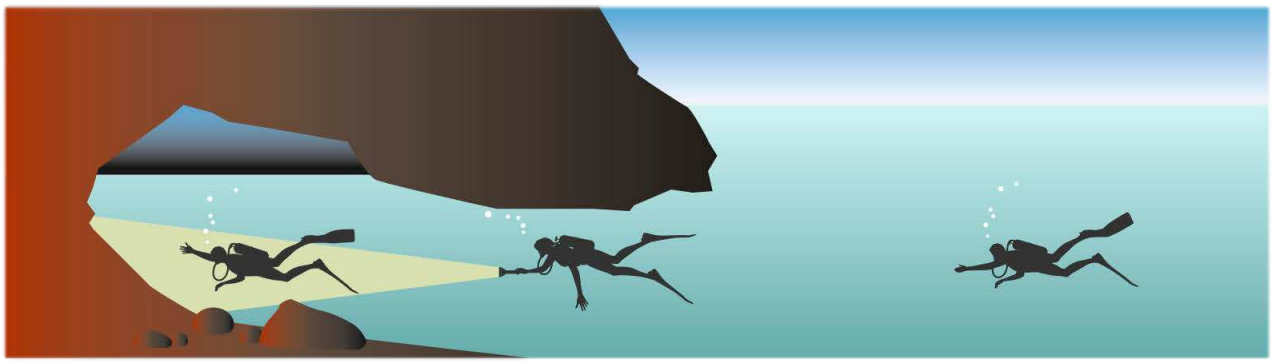
Kolme sukeltajaa on sukeltamassa kuvan mukaisesti samassa syvyydessä. Millainen on veden paine eri sukeltajien kohdalla?

Ratkaisu

Kaikkien sukeltajien kohdalla paine on sama. Kalliokielekkeen alla olevan sukeltajan yläpuolella on vähemmän vettä, mutta sillä ei ole merkitystä, koska Pascalin lain mukaan paine on kaikkialla nesteessä samalla tasolla sama. Jos paine olisi kielekkeen alla pienempi, voima vedessä suuntautuisi kuvassa vasemmalle, mikä aiheuttaisi veden virtaamisen vasemmalle. Luolassa sukeltajan etäisyys vedenpinnasta on pienempi kuin avovedessä olevalla sukeltajalla. Luola on kuitenkin suljettu, joten vesi on puristanut luolassa olevan ilman korkeampaan paineeseen. Luolassa vedenpinnan tasossa paine on sama kuin paine on vedessä vapaan pinnan alla samassa tasossa.

Vastaus

Kaikkien sukeltajien kohdalla paine on sama.

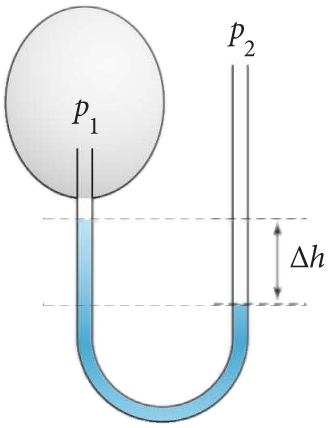


Esimerkki 3 — Kaasusäiliön paine

Avoimessa U-putkimanometrissa nesteenä on elohopeaa. Kaasusäiliön puoleinen nestepinta on korkeammalla kuin avoimen pään puoleinen pinta. Nestepintojen välinen korkeusero on 525 mm. Kuinka suuri

a) alipaine

b) absoluuttinen paine kaasusäiliössä vallitsee?



Ratkaisu

a) $h_1 = 0{,}525\ \text{m}$, $h_2 = 0\ \text{m}$, $\rho = 13\,600\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\Delta p = ?$

Nestepintojen korkeusero ilmaisee paineiden eron, joka on sama kuin säiliön alipaine:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g h_1 - \rho g h_2 = \rho g (h_1 - h_2) = \rho g \Delta h$$

$$= 13\,600\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}525\ \text{m}$$

$$= 70\,043{,}3\ \text{Pa} \approx 70{,}0\ \text{kPa}.$$

b) $p_0 = 101\,325\ \text{Pa}$, $p = ?$

Säiliössä vallitseva absoluuttinen paine on alipaineen verran pienempi kuin ulkoinen ilmanpaine:

$$p = p_0 - \Delta p$$

$$= 101\,325\ \text{Pa} - 70\,043{,}3\ \text{Pa}$$

$$= 31\,281{,}6\ \text{Pa} \approx 31{,}3\ \text{kPa}.$$

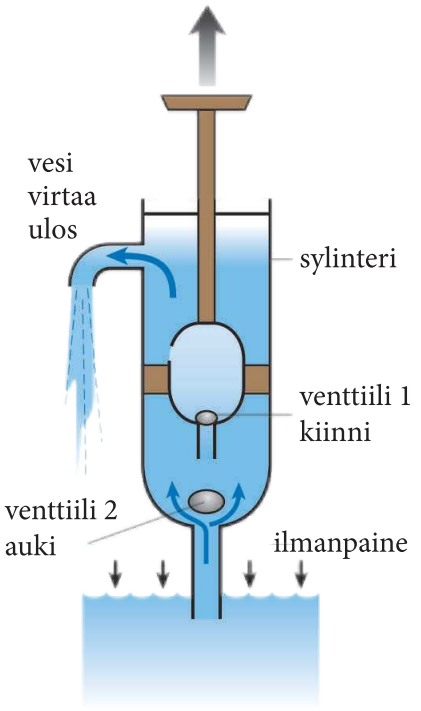
Vastaus

a) Kaasusäiliön alipaine on 70,0 kPa.

b) Kaasusäiliön absoluuttinen paine on 31,3 kPa.

Esimerkki 4 — Imupumpun nostokyky

Kuinka korkealle imupumpulla voisi normaali-ilmanpaineessa nostaa vettä, jos pumpulla saataisiin aikaan täydellinen tyhjiö?



Ratkaisu

$p_h = p_0 = 101\,325$ Pa, $h = ?$

Jos imupumpussa vallitsee tyhjiö, letkussa olevan vesipatsaan aiheuttama hydrostaattinen paine voi olla sama kuin ilmanpaine. Hydrostaattinen paine on $p_h = \rho hg$, josta voidaan ratkaista vesipatsaan korkeus:

$$h = \frac{p_h}{\rho g} = \frac{101\,325\,\text{Pa}}{1\,000\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 10{,}33\,\text{m}.$$

Vastaus

Imupumpulla voidaan vettä nostaa teoriassa 10,33 m.

Huomaa!

Käytännössä imupumpulla voi nostaa vettä enintään 8–9 metriä, sillä imupumppuun ei voi saada täydellistä tyhjiötä.

Tiivistelmä

- Ilmanpaine johtuu ilman omasta painosta.
- Hydrostaattinen paine aiheutuu nesteen omasta painosta.
- Kokonaispaine nesteessä on ilmanpaineen ja hydrostaattisen paineen summa.
- Ilmanpaine havaitaan voimavaikutuksen kautta.
- Paineen mittaaminen perustuu voimavaikutukseen.
- Pumpun toiminta perustuu paine-eroihin.

Perustehtävät

101. Aseta suuruusjärjestykseen suurimmasta pienimpään.
a) ilmanpaine Helsingissä
b) ilmanpaine Mont Everestin huipulla
c) ilmanpaine 10 km:n korkeudessa lentävässä lentokoneessa

102. Lentokoneen ruumaan laitetussa matkalaukussa oleva shampoopullo saattaa vuotaa lennon aikana. Mistä tämä johtuu?

103. Kun ajat autolla vuorelle, korvasi voivat mennä ”lukkoon”. Tämä ilmiö johtuu ilmanpaineen muutoksesta. Mihin suuntaan tärykalvosi liikkuu, kun **a)** ajat vuorelle, **b)** laskeudut vuorelta? Perustele vastauksesi.

104. Ota selvää, mitä tarkoitetaan sukeltajantaudilla ja miten sitä torjutaan.

105. Itämeren syvin kohta on Gotlannin syvänteessä. Sen syvyys on 459 m. Kuinka suuri syvänteen pohjassa vallitseva hydrostaattinen paine on? Oleta Itämeren veden tiheydeksi 1 010 kg/m^3. Esim. 1

106. Kuinka syvällä järvessä hydrostaattinen paine on 0,35 Mpa? Esim. 1

107. Kuinka suuri päälaella ja jalkapohjassa olevissa verisuonissa vallitsevan verenpaineen ero on 174 cm pitkällä henkilöllä? Veren tiheys on likimain sama kuin veden tiheys. Esim. 1

108. Täytä juomalasi vedellä ja peitä lasin suu paksulla pahvinpalalla. Käännä lasi ylösalaisin lavuaarin päällä ja pidä samalla pahvi lasin suulla. Päästä irti pahvista. Mitä havaitset? Selitä havaintosi.

Soveltavat tehtävät

109. Pascal demonstroi paineen leviämistä nesteessä seuraavalla kokeella. Viinitynnyrin kannen läpi oli pistetty tiiviisti pitkä pystysuora putki. Pascal kaatoi putkeen vettä. Kun veden pinta putkessa oli 12 m tynnyrin kannen yläpuolella, tynnyri hajosi. Kuinka suuren voiman vesi kohdisti tynnyrin kanteen juuri ennen tynnyrin hajoamista, kun kannen säde oli 19 cm?

110. Järven hiekkapohjalla on pystyssä tynnyri, jonka pohjan pinta-ala on 0,125 m^2 ja korkeus 45 cm. Tynnyrin massa on 120 kg. Ilmanpaine pinnan yläpuolella on normaali ja pohja on 1,80 metrin syvyydessä. Kuinka suuren voiman

a) vesi kohdistaa tynnyrin yläkanteen

b) vesi kohdistaa tynnyrin pohjaan

c) järven pohja kohdistaa tynnyrin pohjaan?

111. U-putkessa on vettä. Sen toiseen haaraan kaadetaan ruokaöljyä. Putkeen kaadetun ruokaöljypatsaan korkeus on 4,6 cm, ja putken toisessa haarassa oleva vesipinta on 1,1 cm öljyn pintaa alempana. Mikä ruokaöljyn tiheys on?

112. Ilmanpaine on keskimäärin 1013 hPa ja maapallon säde $6{,}37 \cdot 10^6$ m. Arvioi näiden tietojen perusteella ilmakehän massa.

113. Selällään makaavan ihmisen rintakehälle asetetaan tasapohjainen ämpäri, johon kaadetaan 10 litraa vettä. Pohjan pinta-ala on 3,0 dm^2.

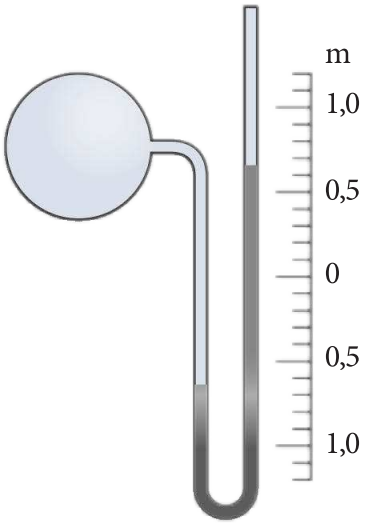
a) Kuinka suuren paineen ämpäri aiheuttaa rintakehään?

b) Kuinka syvällä vedessä hydrostaattinen paine olisi yhtä suuri kuin a-kohdassa laskettu paine?

c) Millä tavoin a- ja b-kohdan paineiden vaikutus on erilainen?

114. Harjoitustyönä tehdyssä Torricellin kokeessa elohopeapatsaan korkeudeksi mitattiin 764 mm. Kuinka suuri ilmanpaine oli pascaleina?

115. Suljetulla U-putkimanometrilla mitattiin kaasusäiliössä olevan kaasun painetta. Putkessa olevan elohopean pintojen välinen korkeusero oli 32,3 cm.



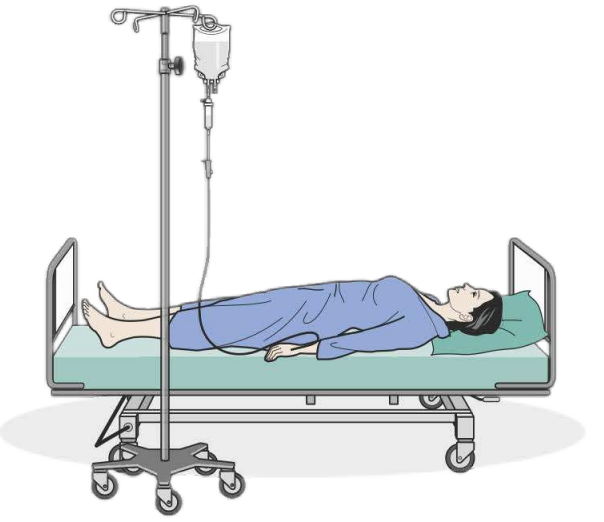
a) Oliko säiliössä ali- vai ylipaine?

b) Kuinka suuri oli kaasusäiliön paine?

116. **a)** Kuinka suuren voiman ilmanpaine aiheuttaa pöydän yläpintaan, kun pöydän pinta-ala on 2,5 m^2?

b) Miksi pöytä ei romahda voiman vaikutuksesta?

117. Kun potilas on tiputuksessa, tiputuspussi ripustetaan kuvan mukaisesti.



a) Miksi pussi ei voi olla potilaan vieressä sängyllä?

b) Laske, kuinka korkealle käden yläpuolelle tiputuspussi on ripustettava, kun nesteen tiheys on 1 020 kg/m^3 ja käteen pistetyn neulan kohdalla hydrostaattisen paineen pitää olla 10,9 kPa.

8 Kaasun paine, tilavuus ja lämpötila riippuvat toisistaan

Kaasun tilanmuuttujat suljetussa systeemissä

Suljetussa systeemissä kaasun ainemäärä on vakio, joten tilanmuuttujat ovat

- tilavuus V
- paine p
- absoluuttinen lämpötila T.

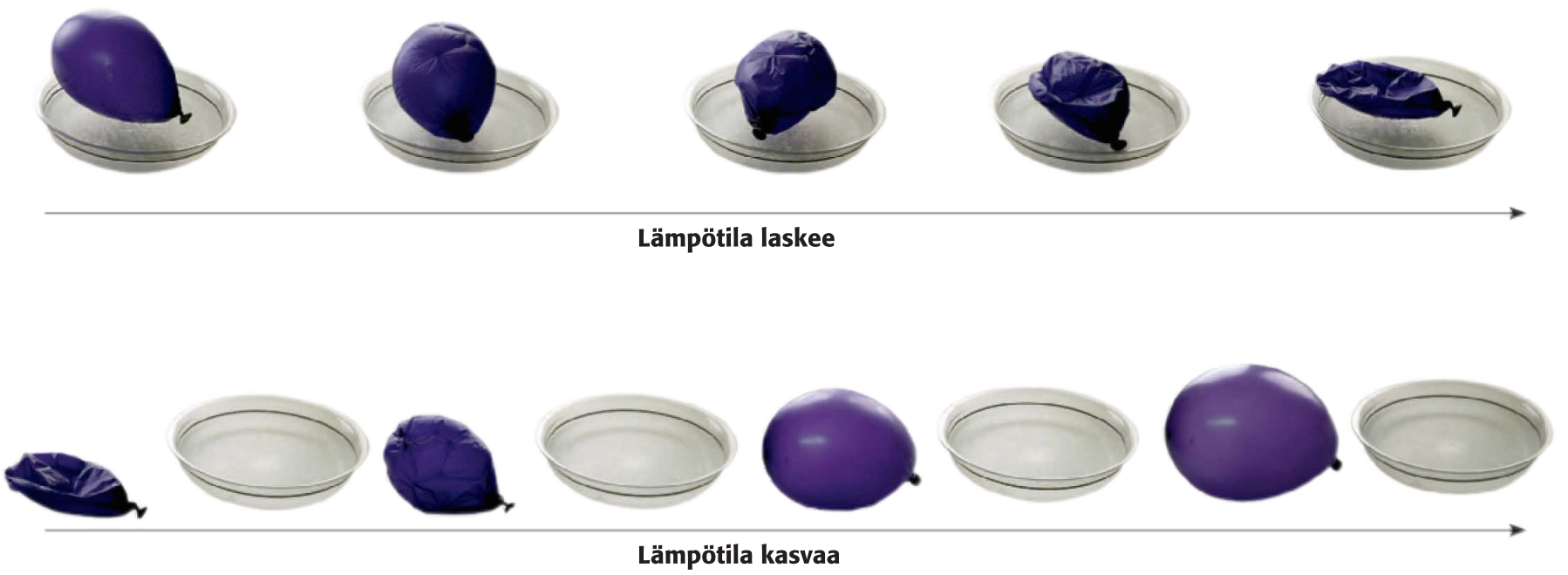
Tilanmuuttujat riippuvat toisistaan siten, että kaksi niistä määrää kolmannen.

Kaasujen ominaisuudet poikkeavat nesteistä ja kiinteistä aineista

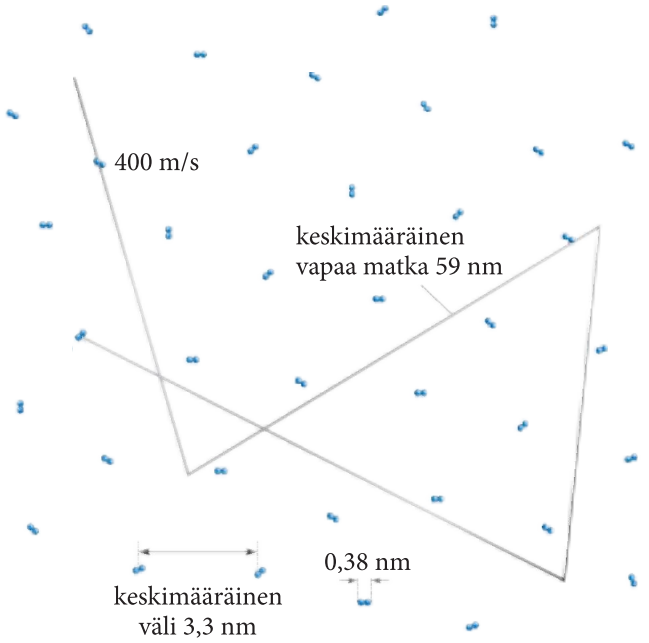
Kaasun tilavuuden, paineen ja lämpötilan riippuvuus toisistaan havaitaan esimerkiksi, kun polkupyörän pumpun mäntää puristetaan ja samalla estetään sormella ilmaa pääsemästä pumpusta ulos. Mitä syvemmälle mäntää halutaan työntää, sitä kovempaa on puristettava. Samalla pumppu lämpenee.

Nesteet ja kiinteät aineet ovat lähes kokoonpuristumattomia, eli niiden tilavuus riippuu vain vähän ulkoisesta paineesta. Kaasut ovat sen sijaan harvaa ainetta ja käyttäytyvät eri tavoin kuin nesteet ja kiinteät aineet. Kaasut pyrkivät laajenemaan itsestään, koska kaasuatomien ja molekyylien väliset voimat eivät rajoita niiden liikettä. Kaasuilla ei ole ulkoista rajapintaa vaan ne täyttävät koko säiliön.

Kun kaasua puristetaan suljetussa astiassa, kaasun massa pysyy samana, mutta tilavuus V pienenee, paine p kasvaa ja lämpötila T voi kohota. Nämä suureet määräävät kaasun tilan. **Tilanmuuttujista** käytetään myös nimitystä **tilasuureet**. Kun jokin tilanmuuttujan arvoista muuttuu, kaasu siirtyy tilasta toiseen.

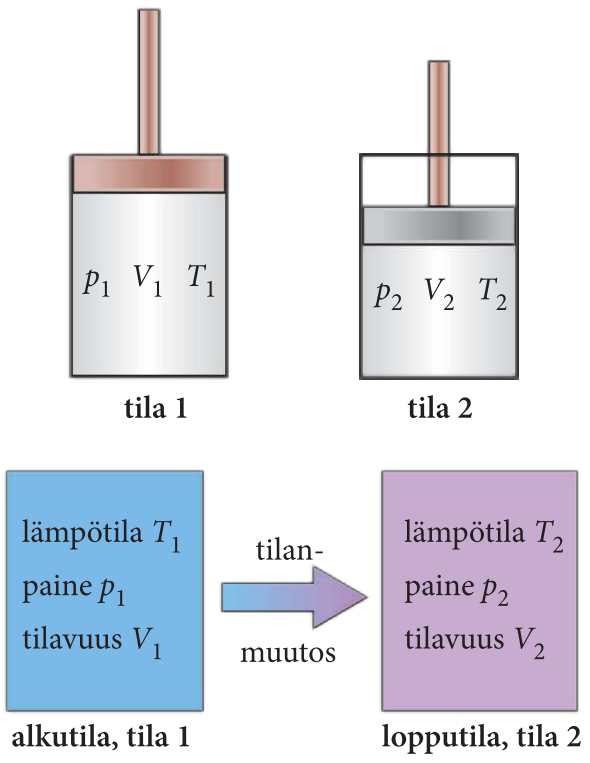


Kaasun lämpötilan muuttuessa sen tilavuus tai paine muuttuu. Pallon tilavuus pienenee, kun sitä jäähdytetään nestemäisellä typellä. Nestemäisen typen lämpötila on –196 °C. Pallon tilavuus palautuu, kun pallo saa olla huoneen lämpötilassa. Ilmapallon sisällä olevan ilman massa ei muutu kokeen aikana.



Typpikaasua normaalitilassa (T = 273,15 K ja p = 1013,25 hPa). Kuvaan on merkitty kaasua kuvaavia matkan ja nopeuden arvoja. Keskimääräinen vapaamatka on matka, jonka rakenneosa kulkee törmäysten välillä. Rakenneosien liike on lämpöliikettä.

Ideaalikaasu
Ideaalikaasu on mallikaasu. Sen tilavuus pienenee rajatta paineen kasvaessa ja lämpötilan laskiessa. Ideaalikaasu ei nesteydy missään olosuhteissa.



Kaasu siirtyy tilasta 1 tilaan 2, kun jokin tilanmuuttujista saa uuden arvon. Kuvassa tilavuus pienenee ja paine kasvaa.

Ideaalikaasu on teoreettinen mallikaasu

Kaasujen käyttäytymistä kuvaavaa mallikaasua kutsutaan **ideaalikaasuksi**, koska sen tilavuuden, paineen ja lämpötilan väliset riippuvuudet ovat yksinkertaisia. Ideaalikaasun mallissa oletetaan, että kaasu koostuu suuresta määrästä pistemäisiä hiukkasia. Niiden liike noudattaa klassisen mekaniikan lakeja. Hiukkaset vuorovaikuttavat ainoastaan törmätessään toisiinsa. Todellisen kaasun rakenneosat eli atomit ja molekyylit eivät ole pistemäisiä ja niiden rakenneosien välillä vaikuttaa sähköiset vuorovaikutukset myös silloin, kun ne eivät törmää. Ideaalikaasun sisäenergia riippuu vain kaasun lämpötilasta, koska ideaalikaasun rakenneosat vuorovaikuttavat ainoastaan törmäyksissä.

Huoneenlämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa lähes kaikki kaasut käyttäytyvät kuin ideaalikaasut.

Ideaalikaasumallin perusoletukset	**Todellisen kaasun ero ideaalikaasuun**
Kaasu koostuu pistemäisistä ja massattomista hiukkasista.	Rakenneosat eivät ole pistemäisiä ja massattomia.
Hiukkasten liike on satunnaista ja suoraviivaista.	Kaasussa voi olla myös virtauksia.
Hiukkaset törmäilevät toisiinsa ja astian seiniin.	Ei eroa.
Hiukkaset vuorovaikuttavat vain törmätessään.	Rakenneosien välillä on vuorovaikutuksia, vaikka ne eivät kosketa.
Törmäykset ovat täysin kimmoisia.	Törmäykset eivät ole välttämättä täysi kimmoisia. Molekyylit voivat pyöriä ja värähdellä.
Kaasun sisäenergia riippuu vain kaasun lämpötilasta.	Rakenneosien välillä on sähköisiä vuorovaikutuksia.

Kaasun tilanmuutosta kuvaa tilanyhtälö

Kaasun tilan määrittelee sen paine, tilavuus ja lämpötila. Tarkastellaan tilannetta, jossa sylinteriin suljetun kaasun tila muuttuu tilasta 1 (p_1, V_1, T_1) tilaan 2 (p_2, V_2, T_2). Koska sylinteri on suljettu, kaasun ainemäärä ei muutu prosessissa. Muutosta havainnollistetaan oheisella kaaviolla.

Kokeelliset havainnot osoittavat, että verrattaessa kaasusysteemin alku- ja lopputilaa tilanmuuttujat noudattavat yhtälöä

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Tämä tarkoittaa, että lausekkeen $\frac{pV}{T}$ arvo ei muutu kaasun tilanmuutoksessa. Havaittua säännönmukaisuutta kutsutaan **kaasujen yleiseksi tilanyhtälöksi**. Tilanyhtälö määrittää systeemin tilanmuuttujien välisen yhteyden tasapainotilassa. Tasapainotilassa kaasun tilanmuuttujat ovat vakioita. Kun reaalikaasu on riittävän harvaa, se noudattaa kaasujen yleistä tilanyhtälöä.

Kaasujen yleinen tilanyhtälö
Kaasusysteemi noudattaa tilanyhtälöä
$\frac{pV}{T}$ = vakio sitä tarkemmin, mitä pienempi kaasun tiheys on eli mitä harvempi se on.

Avogadron laki
Samassa paineessa ja lämpötilassa yhtä suuret tilavuudet eri kaasuja sisältävät yhtä monta rakenneosaa.

Kaasun normaalitila
(NTP, Normal Temperature and Pressure)
Tila, jossa kaasun lämpötila on $T_0 = 273{,}15$ K ja paine on normaali-ilmanpaine $p_0 = 1\,013{,}25$ hPa.

Ideaalikaasun tilanyhtälö
Kun tunnetaan kaasun ainemäärä n, ideaalikaasun tilanyhtälö voidaan ilmaista moolisen kaasuvakion R avulla:
$pV = nRT$.

Ideaalikaasun tilanyhtälö

Vuonna 1811 italialainen Amadeo Avogadro esitti, että kaasut noudattavat lakia, jonka mukaan samassa tilavuudessa, paineessa ja lämpötilassa kaikki kaasut sisältävät yhtä monta rakenneosasta.

Mooli on **ainemäärän** n yksikkö, joka lasketaan kaasun massan m ja **moolimassan** M avulla: $n = \frac{m}{M}$. Yhdessä moolissa on moolimassan osoittama grammamäärä ainetta ja rakenneosia **Avogadron vakion** N_A ilmoittama määrä eli $6{,}022 \cdot 10^{23}$ kappaletta. Jos näytteessä on ainetta n moolia, niin rakenneosia on silloin $N = nN_A$. Yksi mooli kaasua vaatii normaalitilassa tilavuuden $V_{m0} = 22{,}414\ \text{dm}^3$ riippumatta siitä, mikä kaasu on kyseessä. Yhden kaasumoolin viemää tilavuutta sanotaan **moolitilavuudeksi**. Moolitilavuuden arvo riippuu olosuhteista.

Tarkastellaan kaasun tilanmuutosta tilasta 1 (p, V, T) normaalitilaan 2 (p_0, V_0, T_0). Normaalitilassa kaasun tilavuus voidaan ilmaista moolitilavuuden avulla $V_0 = nV_{m0}$. Kaasujen tilanyhtälön mukaan $\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{T_0} = \frac{p_0nV_{m0}}{T_0} = n\frac{p_0V_{m0}}{T_0} = nR$, jossa R on **moolinen kaasuvakio**. Sen arvo on $R = 8{,}3145\ \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$. Ideaalikaasun tilanyhtälö voidaan siten kirjoittaa muotoon $pV = nRT$.

Esimerkki 1 — Kaasun tilat

Kaasunäytteet A ja B ovat suljettuja systeemejä. Kaasunäytteistä mitattiin oheisen taulukon mukaiset suureiden arvot.

	p (10^5 Pa)	V (dm³)	T (K)
1	1,0	11	283
2	1,1	8,5	310
3	1,2	15	597
4	1,3	9,5	317

Mitkä mittauksista liittyvät samoihin näytteisiin?

Ratkaisu

Koska näytteet ovat suljettuja systeemejä, ne eivät vaihda ainetta ympäristönsä kanssa.

Mikäli näytteet ovat samat, pätee kaasujen yleinen tilanyhtälö $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$.

Lasketaan kullekin mittaussarjalle arvo $\frac{pV}{T}$.

	p (10^5 Pa)	V (dm³)	T (K)	$\frac{pV}{T}\left(\frac{\text{Pa} \cdot \text{dm}^3}{\text{K}}\right)$
1	1,0	11	283	3887
2	1,1	8,5	310	3016
3	1,2	15	597	3015
4	1,3	9,5	317	3896

Vastauksista havaitaan, että mittaukset 1 ja 4 ja vastaavasti mittaukset 2 ja 3 vastaavat toisiaan.

Vastaus

Mittaukset 1 ja 4 ja vastaavasti mittaukset 2 ja 3 vastaavat toisiaan.

Esimerkki 2

Ideaalikaasujen tilanyhtälö

Kuinka suuri paine vallitsee vappupallon sisällä, kun pallossa olevan heliumin massa on 3,0 g ja tilavuus 14 litraa 15 °C:n lämpötilassa?

Ratkaisu

$m = 3{,}0\ \text{g}$, $V = 14\ \text{dm}^3$, $T = (15 + 273{,}15)\ \text{K} = 288{,}15\ \text{K}$, $p = ?$

Taulukkokirjan mukaan heliumin moolimassa on $M(\text{He}) \approx 4{,}0\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, ja pallossa olevan heliumkaasun ainemäärä on

$$n = \frac{m}{M} = \frac{3{,}0\ \text{g}}{4{,}0\ \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0{,}75\ \text{mol}.$$

Ideaalikaasujen tilanyhtälön $pV = nRT$ mukaan

$$p = \frac{nRT}{V} = \frac{0{,}75\ \text{mol} \cdot 0{,}083145\ \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 288{,}15\ \text{K}}{14\ \text{dm}^3}$$

$$= 1{,}28\ \text{bar} \approx 0{,}13\ \text{MPa}.$$

Vastaus

Vappupallon sisällä oleva paine on 0,13 MPa.

Esimerkki 3

Kaasukuplan tilavuuden muutos

Veden lämpötila on 25 metrin syvyydessä 6,0 °C. Kaasukupla, jonka tilavuus on 5,0 mm³, nousee pintaan. Kuinka suuri kupla on juuri ennen pintaa, jossa veden lämpötila on 13 °C? Oletetaan, että kaasukupla nousee sen verran hitaasti, että vesi ehtii lämmittää sen. Kaasua ei liukene kuplasta eikä kuplaan nousun aikana.

Ratkaisu

$h = 25\ \text{m}$, $t_1 = 6{,}0\ ^\circ\text{C}$, $V_1 = 5{,}0\ \text{mm}^3$, $t_2 = 13\ ^\circ\text{C}$, $V_2 = ?$

Veden tiheys on $\rho = 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Lämpötilat tilanyhtälössä on annettava kelvineinä, joten lämpötilat on muunnettava kelvineiksi.

$T_1 = (6{,}0 + 273{,}15)\ \text{K} = 279{,}15\ \text{K}$ ja

$T_2 = (13 + 273{,}15)\ \text{K} = 286{,}15\ \text{K}.$

Tila 1: Olosuhteet 25 metrin syvyydellä ovat $T_1 = 279{,}15\ \text{K}$ ja $V_1 = 5{,}0\ \text{mm}^3$. Lasketaan paine tilassa 1:

$$p_1 = p_0 + \rho g h = 1{,}013 \cdot 10^5\ \text{Pa} + 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}81\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 25\ \text{m}$$

$$= 3{,}465 \cdot 10^5\ \text{Pa}.$$

Tila 2: Olosuhteet pinnassa ovat $T_2 = 286{,}15\ \text{K}$, $p_2 = p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5\ \text{Pa}$. Lasketaan tilavuus pinnassa V_2.

Ideaalikaasun tilanyhtälön $\frac{pV}{T} = \text{vakio}$ mukaan $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$, josta voidaan ratkaista kuplan tilavuus V_2 juuri ennen pintaa:

$$V_2 = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} V_1 = \frac{3{,}465 \cdot 10^5\ \text{Pa} \cdot 286{,}15\ \text{K}}{1{,}013 \cdot 10^5\ \text{Pa} \cdot 279{,}15\ \text{K}} \cdot 5{,}0\ \text{mm}^3$$

$$= 17{,}53\ \text{mm}^3 \approx 18\ \text{mm}^3.$$

Vastaus

Kaasukuplan tilavuus on veden pinnalla 18 mm³.

Tiivistelmä

- Kaasujen ominaisuudet poikkeavat nesteistä ja kiinteistä aineista.
- Ideaalikaasu on teoreettinen mallikaasu.
- Kaasun tilanmuutosta kuvaa tilanyhtälö.
- Ideaalikaasun tilanyhtälö on $pV = nRT$.

Perustehtävät

118. **a)** Mitkä ovat kaasun tilanmuuttujat suljetussa systeemissä, ja mitä kaasun tilalla tarkoitetaan?
b) Mitä tarkoittaa tilanmuutos?
c) Anna esimerkki tilanmuutoksesta.

119. Pohdi ja havainnollista kuvalla, mitä ilmapallolle tapahtuu, kun se viedään huoneenlämpötilasta ensin ulos pakkaseen ja sitten kuumaan saunaan.

120. Kaasua sisältävä sylinteri on suljettu tiiviisti herkkäliikkeisellä männällä. Kun mäntää painetaan sisään,
a) kaasun paine kasvaa
b) kaasun paine pienenee
c) kaasun paine ei muutu
d) tulosta ei voi tietää.
Mikä vastauksista on oikein?

121. Kaasua sisältävä sylinteri on suljettu tiiviisti herkkäliikkeisellä männällä. Kun mäntää painetaan sisään,
a) kaasun lämpötila kasvaa
b) kaasun lämpötila pienenee
c) kaasun lämpötila ei muutu
d) tulosta ei voi tietää.
Mikä vastauksista on oikein?

122. Veden lämpötilaksi 14 metrin syvyydellä mitattiin +4,0 °C ja paineeksi 2 386,4 hPa. Kaasukupla, jonka tilavuus on 6,8 mm^3, nousee pintaan. Kuinka suuri kupla on juuri ennen veden pintaa, kun pintaveden lämpötila on 18 °C? Kaasukupla nousee sen verran hitaasti, että vesi ehtii lämmittää sen. Esim. 3

123. Miten tilanmuuttujat muuttuvat, kun kaasu siirtyy alkuperäisestä tilasta tiloihin 1, 2 ja 3?

Tila	1	2	3
p	vakio	pienenee	
V	kasvaa		vakio
T		vakio	kasvaa

124. **a)** Kaada kupillinen kuumaa vettä tyhjään muoviseen virvoitusjuomapulloon. Ravista, kaada vesi pois ja sulje korkki nopeasti. Laske pullon päälle kylmää vettä. Selitä havainnot.
b) Mitä tilanmuuttujia tarvitaan ilmiön selittämiseksi?
c) Mikä tilanmuutos kokeessa tapahtuu?

Soveltavat tehtävät

125. Painesäiliössä, jonka tilavuus on 25 litraa, on vetyä. Vedyn paine on 16 MPa ja lämpötila 20 °C. Laske vedyn
a) ainemäärä
b) massa
c) tiheys.

126. Painesäiliössä, jonka tilavuus on 50 litraa, on typpikaasua 35 baarin paineessa 22 °C:n lämpötilassa. Laske typen ainemäärä ja massa.

127. Ilman tiheys pienenee ylöspäin noustaessa. Kuinka suuri ilman tiheys on 20 km:n korkeudessa, kun lämpötila sillä korkeudella on noin –60 °C ja paine noin 53 hPa? Maanpinnalla normaalipaineessa ja 0 °C:n lämpötilassa ilman tiheys on 1,29 kg/m^3.

128. Kun polkupyörän pumpun mäntä vedettiin ulos, pumpussa olevan ilman tilavuus oli 80 cm^3, lämpötila 20 °C ja paine 100 kPa. Ulostuloaukko suljettiin sormella ja ilma puristettiin neljäsosaan alkuperäisestä tilavuudestaan. Pumppuun asennetulla lämpösähköparilla mitattiin lämpötilan nousseen 24 °C:seen. Kuinka suureksi pumpussa oleva paine kasvoi?

129. Ilmasäiliön tilavuus on 150 dm^3. Kun lämpötila on –15 °C, säiliön kyljessä oleva painemittari näyttää 1 850 kPa:n painetta. Kuinka monta litraa ilmaa säiliössä on +22 °C:n lämpötilassa normaali-ilmanpaineessa?

130. Selitä kaasun mikromallin avulla, mitä säiliössä tapahtuu, kun
a) kaasua lämmitetään niin, että sen tilavuus pysyy samana
b) säiliön tilavuus kasvaa niin, että kaasun lämpötila ei muutu
c) kaasua lämmitetään, mutta paine ei saa kasvaa.

9 Kaasujen yleisestä tilanyhtälöstä saadaan kolme kaasulakia

Boylen laki
Vakiolämpötilassa kaasun paine ja tilavuus ovat kääntäen verrannolliset eli
pV = vakio.

V(10^{-6} m^3)	p (kPa)	pV(10^{-3} Nm)
4	130,6	522,5
6	87,3	523,8
8	67,5	540,0
9	59,4	534,6
10	53,1	531,0
12	44,2	530,4
14	38,1	533,4
16	33,1	529,6
18	29,9	538,2
20	26,4	528,0

Isotermisessä muutoksessa lämpötila on vakio

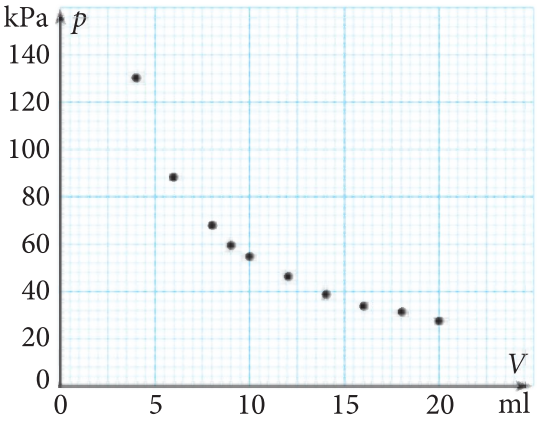
Kaasujen yleinen tilanyhtälö kertoo kaasun paineen, lämpötilan ja tilavuuden välisen yhteyden tasapainotilassa, kun ainemäärä on vakio. Kun tutkitaan kaasun siirtymistä tilasta toiseen, pätee

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}.$$

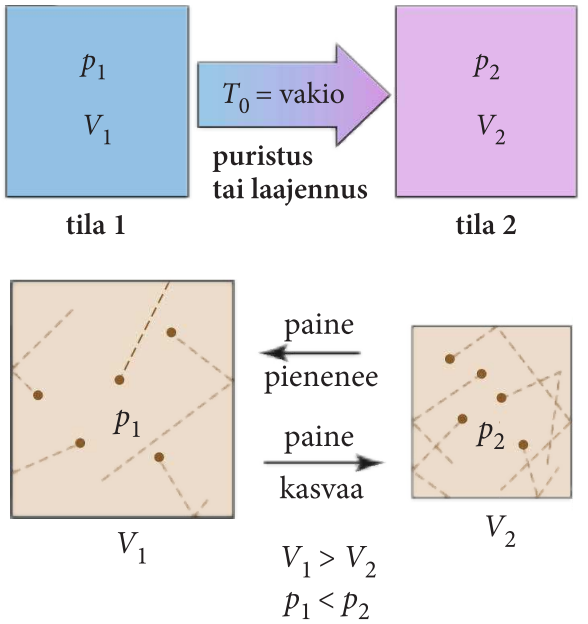
Tarkastellaan seuraavaksi **isotermistä** tilanmuutosta eli muutosta, jossa lämpötila T on vakio tilanmuutoksen ajan. Kaasujen yleinen tilanyhtälö saadaan muotoon $\frac{p_1V_1}{T} = \frac{p_2V_2}{T}$, josta kertomalla puolittain lämpötilalla T saadaan $p_1V_1 = p_2V_2$. Tämä tarkoittaa, että lausekkeen pV arvo on vakio kaasun isotermisessä tilanmuutoksessa. Tätä säännönmukaisuutta kutsutaan **Boylen laiksi,** pV = vakio. Kun yhtälö kirjoitetaan muotoon $p = \frac{\text{vakio}}{V}$, havaitaan, että paine on kääntäen verrannollinen tilavuuteen. Kun tilavuus kasvaa, niin paine pienenee.

Boylen lain kokeellinen todentaminen

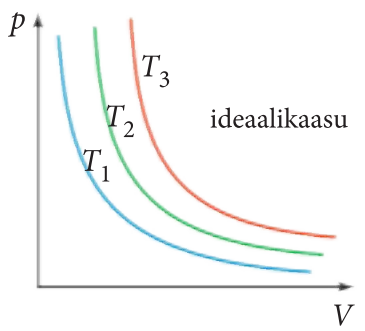
Boylen laki voidaan todentaa kokeellisesti esimerkiksi lääkeruiskulla. Mitataan ruiskussa olevan ilman painetta samalla, kun mäntää puristetaan niin, että ilmatilavuus ruiskussa pienenee. Lämpötila pysyy vakiona, kun ruisku on upotettuna veteen ja puristaminen tehdään hitaasti. Mittaustulokset on koottu oheiseen taulukkoon. Mitatut paineen ja tilavuuden arvot sijoitetaan V, p -koordinaatistoon, jolloin saadaan kuvaaja kaasun paineen ja tilavuuden keskinäisestä riippuvuudesta. Kuvaajasta havaitaan, että kaasun paine on kääntäen verrannollinen tilavuuteen, kuten Boylen laki kertoo.



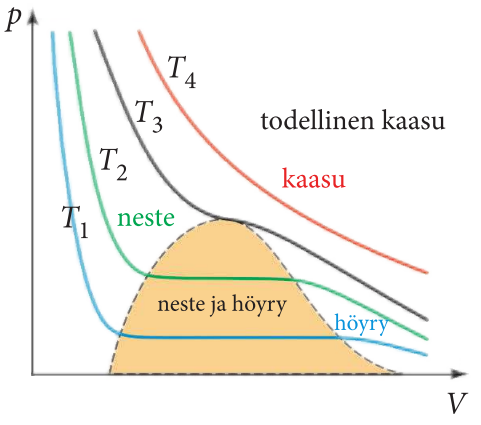
Kaasun paine on kääntäen verrannollinen tilavuuteen:
$\boldsymbol{p = \frac{\text{vakio}}{V}}$.



Kaasun tila muuttuu tilasta 1 tilaan 2 lämpötilan pysyessä vakiona. Tällöin pätee $p_1V_1 = p_2V_2$



Ideaalikaasun isotermejä eri lämpötiloissa ($T_1 < T_2 < T_3$) V, p -koordinaatistossa. Boylen lain vakio saa eri arvon eri lämpötiloissa.



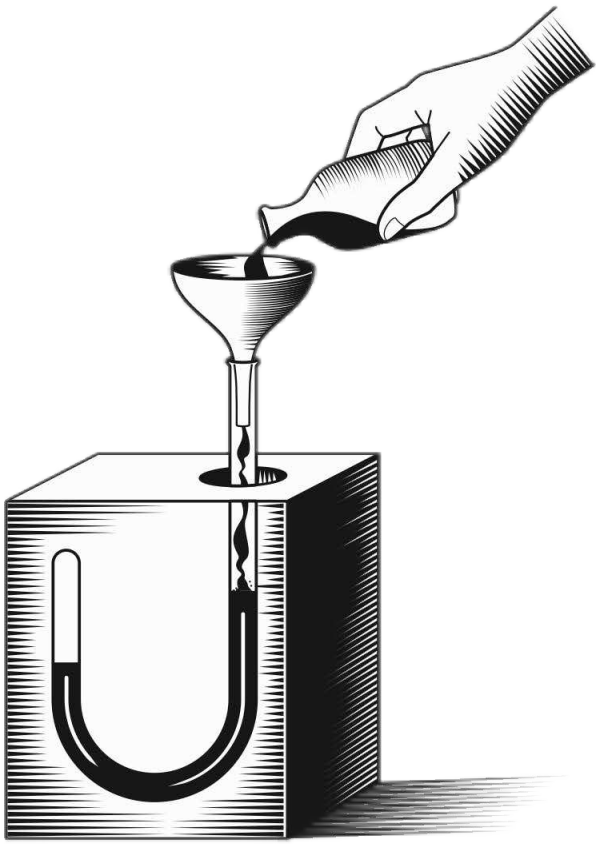
Isotermistä T_4 havaitaan, että lämpötilan ollessa riittävän korkea todellinen kaasu noudattaa Boylen lain mukaista ideaalikaasun käyttäytymistä. Matalammassa lämpötilassa todellinen kaasu nesteytyy eikä noudata enää Boylen lakia.

Boylen lain pätevyysalue riippuu kaasusta

Boylen laki pätee vain tilanteissa, joissa kaasun kokoonpuristamisen tai laajenemisen aikana systeemin lämpötila on vakio. Muutosta havainnollistetaan oheisella kaaviolla.

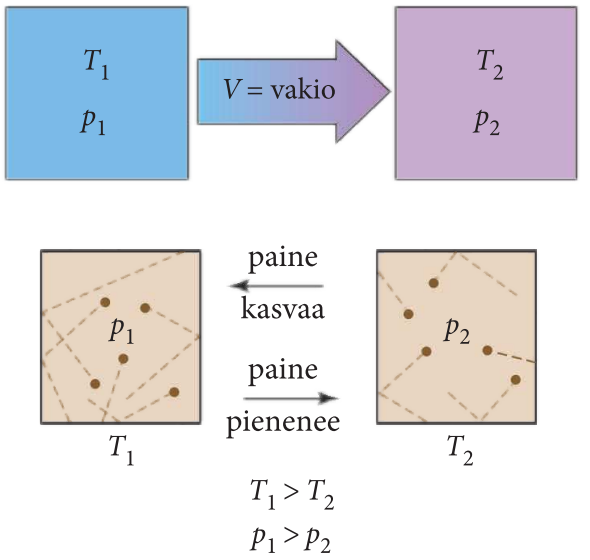
Käyriä, jotka kertovat paineen ja tilavuuden riippuvuuden tietyssä vakiolämpötiloissa, sanotaan **isotermeiksi**. Kreikkalaisperäisten yhdyssanojen iso-alkuosa merkitsee ”sama, yhtäläinen” ja loppuosa ”terminen” tulee sanasta ”lämpötila”. Koska ideaalikaasu ei nesteydy missään olosuhteissa, eri lämpötiloja vastaavat isotermit ovat samanmuotoisia käyriä. Yhtälön pV = vakio vakiotermi on kullekin lämpötilalle erilainen.

Todelliset kaasut noudattavat Boylen lakia sitä paremmin, mitä kauempana kaasumolekyylit keskimäärin toisistaan ovat. Silloin kaasun tiheys on pieni, paine matala ja lämpötila tarpeeksi paljon kiehumispistettä korkeampi. Kun painetta lisätään ja lämpötilaa alennetaan, kaasu nesteytyy eikä Boylen lakia voida enää soveltaa. Tämä voidaan havaita myös isotermikäyrän muodosta. Boylen lain pätevyysalue on erilainen eri kaasuille, koska ne nesteytyvät eri olosuhteissa.



Englantilainen fyysikko Robert Boyle tutki kaasujen käyttäytymistä 1600-luvulla. Hän teki kokeita muun muassa U-putkella, jonka toinen pää oli suljettu niin, että putkeen jäi ilmaa. Putken toiseen haaraan Boyle kaatoi elohopeaa ja seurasi ilmatilan pienenemistä.

Charlesin laki
Vakiotilavuudessa kaasun paine on suoraan verrannollinen sen absoluuttiseen lämpötilaan.

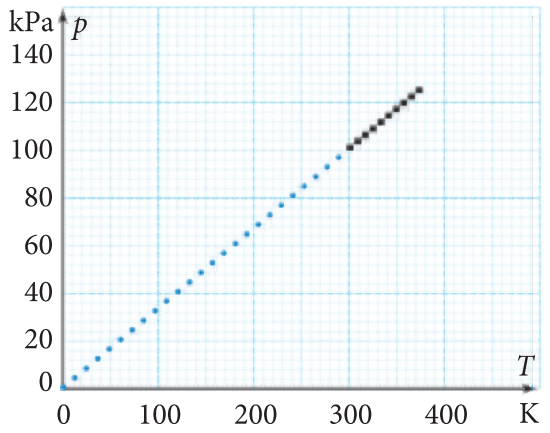


Isokoorisessa tilanmuutoksessa tilavuus on vakio

Kun suljetussa säiliössä olevaa kaasua lämmitetään niin, että säiliön tilavuus ei muutu, kaasun paine säiliössä kasvaa. Kaasun siirtymisessä tilasta toiseen pätee yleisesti paineen, tilavuuden ja lämpötilan välinen kaasujen yleinen tilanyhtälö $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$.

Jos tilavuus pysyy muutoksessa vakiona ($V_1 = V_2 = V$), sanotaan tilanmuutosta **isokooriseksi** tilanmuutokseksi. Kaasujen yleinen tilanyhtälö saa tällöin muodon $\frac{p_1V}{T_1} = \frac{p_2V}{T_2}$, josta saadaan $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$. Tämä tarkoittaa, että lausekkeen $\frac{p}{T}$ arvo on vakio kaasun isokoorisessa tilanmuutoksessa eli kaasun paine on suoraan verrannollinen lämpötilaan, p = vakio · T. Tätä säännönmukaisuutta kutsutaan **Charlesin laiksi.** Ranskalainen fyysikko ja kemisti Jacques Alexandre Charles (1746–1823) havaitsi kokeellisesti kaasujen paineen ja lämpötilan riippuvuuden. Havainto oli ensimmäinen, joka viittasi mahdollisen lämpötilan alarajan olemassaoloon.

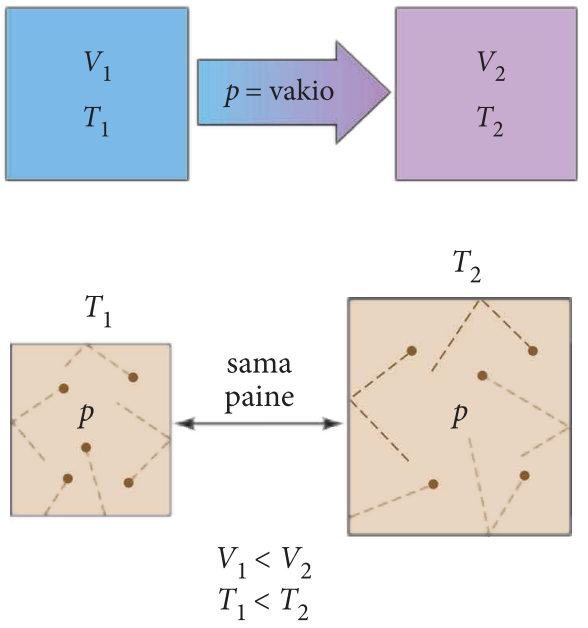
Charlesin laki voidaan todentaa, kun suljetussa astiassa olevaa kaasua lämmitetään. Mittauksissa saadaan viereisen kuvan mukaiset tulokset. Mittaustulosten graafisesta esityksestä havaitaan, että paine pienenisi ja saavuttaisi arvon nolla lämpötilassa –273,15 °C. Tämä pätee vain ideaalikaasulle, sillä todellinen kaasu nesteytyisi, eikä sen paine voi saavuttaa arvoa nolla. Lämpötila –273,15 °C on alin mahdollinen lämpötila eli **absoluuttinen nollapiste** 0 K.



Kun paineen ja lämpötilan riippuvuutta esittävää suoraa jatketaan, se leikkaa lämpötila-asteikon absoluuttisessa nollapisteessä –273,15 °C. Jos paineakseli siirretään absoluuttisen nollapisteen kohdalle, suora alkaa origosta ja paine on suoraan verrannollinen lämpötilaan kelvinasteina, p = vakio · T.

Charlesin laki voidaan todentaa yksinkertaisella laitteistolla. Astian tilavuus pysyy vakiona, vaikka kaasun lämpötila ja paine muuttuvat.

Gay-Lussacin laki
Vakiopaineessa kaasusysteemin tilavuus on suoraan verrannollinen sen absoluuttiseen lämpötilaan $\frac{V}{T}$ = vakio.



Kaasun tila muuttuu tilasta 1 tilaan 2 paineen pysyessä vakiona.

Isobaarisessa tilanmuutoksessa paine on vakio

Kaasu laajenee, kun sitä lämmitetään. Prosessia sanotaan **isobaariseksi**, jos kaasun paine ei muutu tilanmuutoksen aikana. Kaasujen yleinen tilanyhtälö saa tällöin muodon $\frac{pV_1}{T_1} = \frac{pV_2}{T_2}$, josta saadaan $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$. Tämä tarkoittaa, että lausekkeen $\frac{V}{T}$ arvo on vakio kaasun tilanmuutoksessa eli kaasun tilavuus on suoraan verrannollinen lämpötilaan, V = vakio · T. Tätä säännönmukaisuutta kutsutaan **Gay-Lussacin laiksi**.

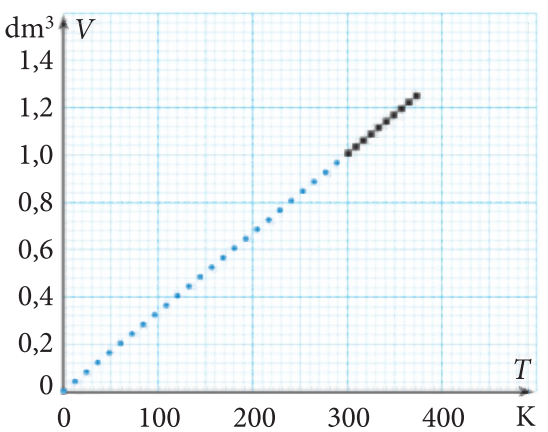
Gay-Lussacin laki voidaan todentaa mittaamalla kaasun tilavuutta lämpötilan funktiona, kun paine pidetään vakiona. Tuloksia esittävästä graafisesta esityksestä havaitaan, että kaasun tilavuus lähestyy nollaa, kun sen lämpötila lähestyy absoluuttista nollapistettä. Todellisille kaasuille laki ei päde lämpötilan lähestyessä absoluuttista nollapistettä, sillä tällöin kaasu nesteytyy. Kaasun tilavuus ei voi saada arvoa nolla, sillä todellisen kaasun rakenneosilla on tietty tilavuus.

Kaasulait selitetään mikromallien avulla

Boylen laki voidaan selittää mikromallin avulla. Kun kaasun lämpötila pidetään vakiona, kaasumolekyylien keskimääräinen nopeus ei muutu. Tilavuuden pienentyessä kaasumolekyylit ovat lähempänä toisiaan. Tästä seuraa, että molekyylien törmäysten määrä astian seiniin lisääntyy ja näin ollen paine kasvaa. Tilavuuden suurentaminen vähentää törmäyksiä astian seiniin, ja paine pienenee.

Myös Charlesin laki voidaan selittää mikromallilla. Kun tilavuus pidetään vakiona ja lämpötilaa nostetaan, kaasumolekyylien nopeus kasvaa. Tällöin törmäyksissä seinämiin vaikuttavat voimat sekä törmäysten määrä aikayksikössä astian seinämiin lisääntyy, joten paine kasvaa.

Gay-Lussacin laki selitetään mikromallilla seuraavasti: Kun kaasua lämmitetään, sen molekyylien lämpöliike kasvaa ja paine pyrkii nousemaan. Jotta paine pysyisi vakiona, kaasun tilavuuden on muututtava ja tästä syystä astian tilavuuden on muututtava.



Kaasun tilavuus on suoraan verrannollinen absoluuttiseen lämpötilaan, V = vakio · T.

Gay-Lussacin laki voidaan todentaa koulussakin oheisella laitteistolla. Pullossa olevan kaasun paine pysyy vakiona, koska laajeneva kaasu purkautuu mittalasiin.

Esimerkki 1 — Boylen lain todentaminen

Laboroinneissa tutkittiin ilmatäytteisen kaasusylinterin paineen riippuvuutta sylinterin tilavuudesta. Koe suoritettiin siten, että sylinterissä olevan kaasun lämpötila pysyi vakiona. Mittauksista saatiin oheiset tulokset.

V (cm³)	50	45	40	35
p (hPa)	1 005	1 120	1 250	1 440

a) Toteutuuko Boylen laki mittauksissa?

b) Esitä mittaustulokset $\frac{1}{V}$, p -koordinaatistossa.

c) Voidaanko kuvaajan perusteella päätellä, toteutuuko Boylen laki mittauksissa?

d) Mikä on säiliössä olevan ilman paine, kun sylinterin tilavuus on 43 cm³?

Ratkaisu

a) Mikäli mittaustulokset noudattavat Boylen lakia, on tulon pV oltava vakio.

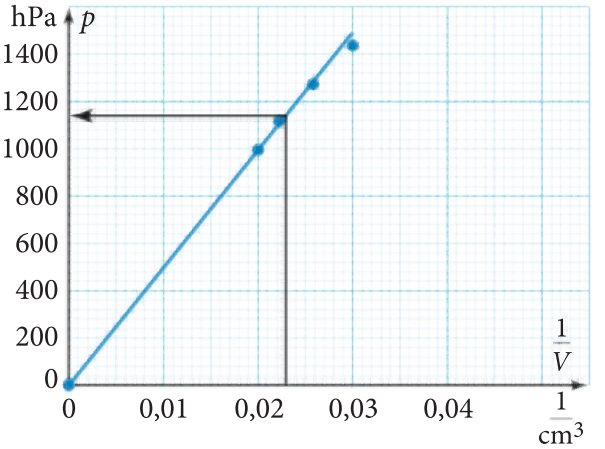
Lasketaan tulot.

V (cm³)	50	45	40	35
p (hPa)	1 005	1 120	1 250	1 440
pV (hPa · cm³)	50 250	50 400	50 000	50 400

Tulokset osoittavat, että tulo pV on likimain vakio, joten Boylen laki toteutuu mittauksissa.

b) Lasketaan arvot $1/V$.

V (cm³)	50	45	40	35
p (hPa)	1 005	1 120	1 250	1 440
$\frac{1}{V}\left(\frac{1}{\text{cm}^3}\right)$	0,020	0,022	0,025	0,029



c) Pisteet asettuvat hyvin suoralle, joten paine on kääntäen verrannollinen tilavuuteen. Boylen laki toteutuu.

d) Lasketaan tilavuudelle 43 cm³ käänteisarvo, joka on 0,023 $\frac{1}{\text{cm}^3}$, ja luetaan paineen arvo suoralta. Näin saadaan paineelle arvo 1 150 hPa.

Vastaus

a) ja **c)** Boylen laki toteutuu mittauksissa.

d) Paine on 1 150 hPa.

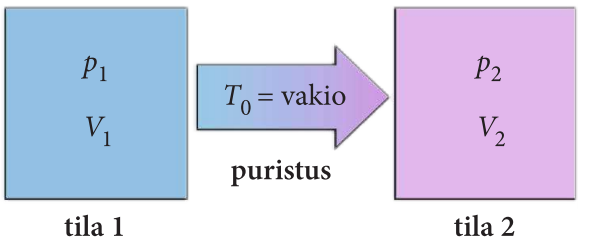
Esimerkki 2 — Boylen laki A

Koripalloilija istuu koripallon päälle. Kuinka paljon pallon tilavuuden pitäisi pienentyä, jotta paine pallossa kasvaisi 20 %? Pallon lämpötila pysyy vakiona.

Ratkaisu

Merkitään painetta alkutilassa p_1 ja tilavuutta V_1.
Lopputilan paine on $p_2 = 1{,}2p_1$, ja tilavuutta V_2 kysytään.
Koska lämpötila pysyy vakiona, tilanmuutos on isoterminen.
Kaasu noudattaa Boylen lakia $p_1 V_1 = p_2 V_2$, josta

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{1{,}2 \cdot p_1} \approx 0{,}833\ V_1.$$



Tilavuuden muutos on siten
$\Delta V = V_2 - V_1 = 0{,}833\ V_1 - V_1$
$= -0{,}167\ V_1 \approx -0{,}17\ V_1.$

Vastaus

Paine pallossa kasvaa 20 %, jos tilavuus pienenee 17 %.

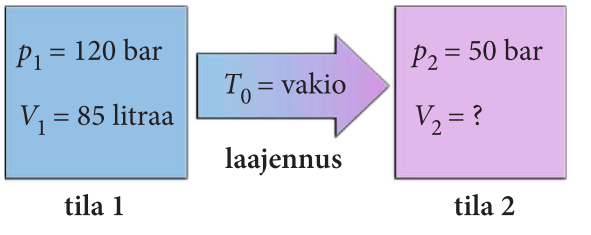
Esimerkki 3 — Boylen laki B

Kaasusäiliön tilavuus on 85 litraa ja paine on 120 bar. Säiliöstä täytetään pieniä 20 litran säiliöitä, jotka kestävät 50 baarin paineen. Kuinka monta pientä säiliötä saadaan täytettyä, kun lämpötila pysyy vakiona täytön aikana?

Ratkaisu

Alkutila: $p_1 = 120$ bar ja $V_1 = 85$ l.
Lopputila: $p_2 = 50$ bar ja tilavuutta V_2 kysytään.
Koska säiliön ja kaasun lämpötila pysyy vakiona, tilanmuutos on isoterminen eli kaasu noudattaa Boylen lakia $p_1 V_1 = p_2 V_2$.
Lasketaan, kuinka paljon isosta pullosta saadaan 50 baarin paineessa olevaa kaasua:

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{120\ \text{bar} \cdot 85\ \text{l}}{50\ \text{bar}} = 204\ \text{l}.$$



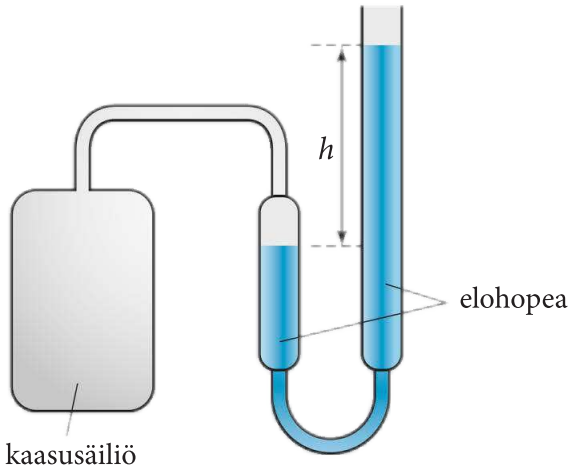
Säiliöstä voidaan ottaa kaasua 50 baarin paineessa $204\ \text{l} - 85\ \text{l} = 119\ \text{l}$.
Pullosta saadaan 20 litran kaasueriä $\frac{119\ \text{l}}{20\ \text{l}} = 5{,}95$ kappaletta.
Loput kaasusta jää pulloon, joten 5 pientä kaasusäiliötä voidaan täyttää.

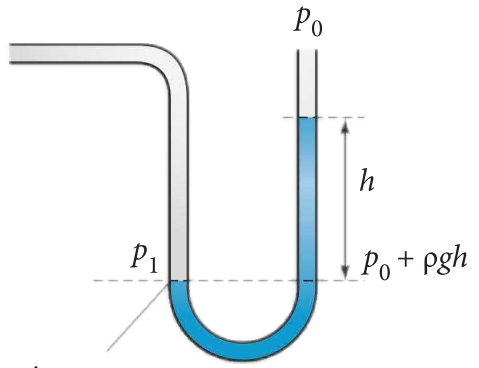
Vastaus

Kaasusäiliöitä voidaan täyttää viisi kappaletta.

Esimerkki 4 — Charlesin laki

Kaasulämpömittarin elohopeapinnat ovat yhtä korkealla, kun kaasun lämpötila on 0,0 °C ja ulkona on normaali-ilmanpaine 1 013 hPa. Mikä on kaasun lämpötila, kun elohopean pinta on noussut putkessa 170 mm?





Ratkaisu

$t_1 = 0{,}0\ °\text{C}$, $p = 1013\ \text{hPa}$, $h = 170\ \text{mm}$, $t_2 = ?$

Kaasulämpömittarin toiminta perustuu kaasun paineen muuttumiseen lämpötilan muuttuessa. Paineen muutokset mitataan elohopeapintojen korkeuserosta.

Kaasulämpömittarin kaasusäiliön tilavuus on putken tilavuuteen verrattuna suuri, joten elohopeapintojen korkeuden vaihtelut eivät merkittävästi muuta kaasun tilavuutta säiliössä, ja tilanmuutos on isokoorinen. Paine on tällöin Charlesin lain mukaan verrannollinen lämpötilaan.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \text{joten} \quad T_2 = \frac{p_2}{p_1} \cdot T_1.$$

Elohopeapintojen korkeuseron aiheuttama hydrostaattinen paine on

$$\begin{aligned} p_h &= \rho g h \\ &= 13{,}6 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 170 \cdot 10^{-3}\ \text{m} \\ &\approx 22680{,}7\ \text{Pa}, \end{aligned}$$

ja ilmanpaine $p_0 = 1\,013\ \text{hPa}$.

Paine pullossa on silloin

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 + \rho g h \\ &= 1013\ \text{hPa} + 226{,}8\ \text{hPa} = 1239{,}8\ \text{hPa}, \end{aligned}$$

ja pullossa olevan kaasun lämpötila on

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{p_2}{p_1} \cdot T_1 \\ &= \frac{1239{,}8\ \text{hPa}}{1013\ \text{hPa}} \cdot 273{,}15\ \text{K} = 334{,}30\ \text{K} \end{aligned}$$

eli

$t_2 = (334{,}30 - 273{,}15)\ °\text{C} = 60{,}15\ °\text{C} \approx 60\ °\text{C}.$

Vastaus

Pullossa olevan kaasun lämpötila on 60 °C.

Esimerkki 5 — Gay-Lussacin laki

Rantasauna lämmitetään tammikuussa, kun ulkolämpötila on –22 °C. Lattian koko on 3,6 m × 3,2 m, ja saunan korkeus on 2,2 m. Arvioi, kuinka paljon enemmän ilmaa virtaa ulos lämmityksen aikana kuin sitä tulee sisälle, kun sauna on kylpykunnossa 80 °C:n lämpötilassa.

Ratkaisu

$t_1 = -22\ °C$, $t_2 = 80\ °C$, $A = 3{,}6\ m \cdot 3{,}2\ m$, $h = 2{,}2\ m$, $\Delta V = ?$

Ilmanpaine pysyy samana lämmityksen ajan, koska ilmaa pääsee virtaamaan saunaan ja ulos saunasta. Ilma noudattaa tarkasteltavalla lämpötilavälillä Gay-Lussacin lakia

$$\frac{V}{T} = \text{vakio}, \quad \text{joten} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Lämpötilat ovat

$$T_1 = (-22 + 273{,}15)\ K = 251{,}15\ K$$

ja

$$T_2 = (80 + 273{,}15)\ K = 353{,}15\ K.$$

Saunan ja samalla kylmän ilman tilavuus on

$$V_1 = 3{,}6\ m \cdot 3{,}2\ m \cdot 2{,}2\ m = 25{,}34\ m^3.$$

Ratkaistaan tilavuus, jonka lämmennyt ilma vaatii:

$$V_2 = \frac{T_2 V_1}{T_1}$$

$$= \frac{353{,}15\ K \cdot 25{,}34\ m^3}{251{,}15\ K} \approx 35{,}63\ m^3.$$

Ilman tilavuuden muutos on

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

$$= 35{,}63\ m^3 - 25{,}34\ m^3 = 10{,}29\ m^3 \approx 10\ m^3.$$

Vastaus:

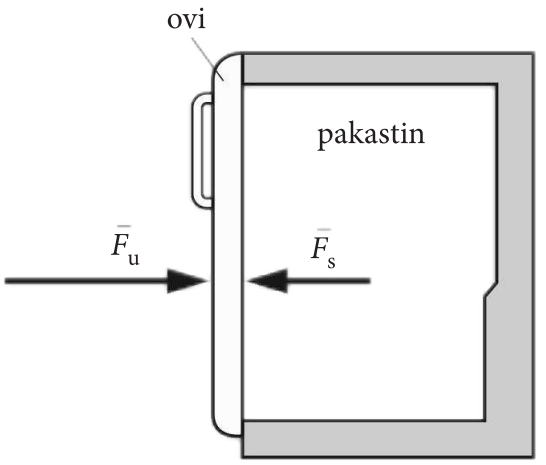
Arvio ulosvirtaavan ilman määräksi on noin $10\ m^3$.

Esimerkki 6 — Paine-ero ja voima

Kun pakastimen ovi avataan, sieltä virtaa ulos ilmaa, jonka lämpötila on –18 °C. Kun ovi suljetaan, pakastimen ilman lämpötila on noussut –10,5 °C:seen. Huoneessa on normaali-ilmanpaine.

a) Kuinka suuri paine pakastimessa on, kun lämpötila on laskenut takaisin pakastimen alkuperäiseen lämpötilaan?

b) Kuinka suuri paine-erosta johtuva voima puristaa ovea kiinni, kun oven pinta-ala on 0,45 m²?



Huomaa!

Jos ovea koetetaan avata uudelleen heti sulkemisen jälkeen, se tuntuu olevan lujasti kiinni. Koska oven tiivisteet kuitenkin vuotavat jonkin verran, paine-ero häviää melko nopeasti ja avaamiseen tarvittava voima pienenee.

Oveen kohdistuva kokonaisvoima on tietysti nolla, koska oven reunoilla tiiviste kohdistaa oveen tukivoiman ulospäin.

Ratkaisu

a) $t_2 = -18\ °C$, $t_1 = -10{,}5\ °C$, $p_2 = ?$ Pakastimen tilavuus ei muutu, joten ilman tilavuus on vakio. Lämpötilan muutos on isokoorinen prosessi, joten sovelletaan Charlesin lakia

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Alkutila, lämmennyt ilma pakastimessa:

$$p_1 = 1013\ \text{hPa}$$
$$T_1 = (-10{,}5 + 275{,}15)\ \text{K}$$
$$= 262{,}65\ \text{K}$$

Lopputila, jäähtynyt ilma pakastimessa:

$$p_2 = ?$$
$$T_2 = (-18 + 273{,}15)\ \text{K}$$
$$= 255{,}15\ \text{K}$$

Oven sulkemisen jälkeen ilma pakastimessa jäähtyy, ja jäähtymisen jälkeen paine pakastimessa on

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1}$$
$$= \frac{1013\ \text{hPa} \cdot 255{,}15\ \text{K}}{262{,}65\ \text{K}}$$
$$= 984{,}07\ \text{hPa} \approx 980\ \text{hPa}.$$

b) $F = ?$ Koska sekä pakastimen sisäpuolella oleva ilma että ulkopuolella oleva ilma vuorovaikuttavat oven kanssa, oveen kohdistuvan kiinnipuristavan voiman suuruus F on sisäisestä ilmanpaineesta ja ulkoisesta ilmanpaineesta aiheutuvien voimien suuruuksien erotus ja verrannollinen paine-eroon:
$F = F_u - F_s = p_1 A - p_2 A = (p_u - p_s)A = \Delta p A.$

Oven sulkemisen jälkeen paine pakastimessa on muuttunut
$\Delta p = 984{,}07\ \text{hPa} - 1013\ \text{hPa} = -28{,}93\ \text{hPa}.$
Pakastimen sisäpuolelle syntyy alipaine.
Ovea kiinni puristava voima on
$F = \Delta p A = 28{,}93\ \text{hPa} \cdot 0{,}45\ \text{m}^2 = 1302\ \text{N} \approx 1{,}3\ \text{kN}.$

Vastaus

a) Paine on 980 hPa.
b) Ovea kiinni puristava voima on 1,3 kN.

Tiivistelmä

- Isotermisessä muutoksessa lämpötila on vakio.
- Boylen lain pätevyysalue riippuu kaasusta.
- Isokoorisessa tilanmuutoksessa tilavuus on vakio.
- Isobaarisessa tilanmuutoksessa paine on vakio.

Perustehtävät

131. **a)** Mikä on Boylen laki, ja milloin sitä voidaan käyttää?
b) Millainen on isoterminen prosessi?

132. **a)** Mikä on Gay-Lussacin laki, ja milloin sitä voidaan käyttää?
b) Millainen on isobaarinen prosessi?

133. **a)** Mikä on Charlesin laki, ja milloin sitä voidaan käyttää?
b) Millainen isokoorinen prosessi on?

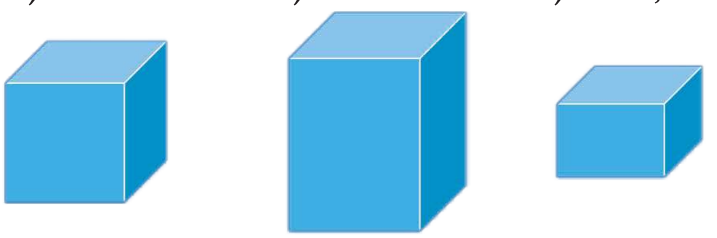
134. Suljetussa astiassa on kaasua. Astian tilavuus on 1 l. Systeemin tilaa muutetaan niin, että lämpötila on

a) $T = 250$ K **b)** $T = 300$ K **c)** $T = 200$ K.

Missä astioista on suurin paine?

135. Suljetussa astiassa on kaasua. Systeemin tilaa muutetaan niin, että paine pysyy vakiona.

a) $V = 1$ l **b)** $V = 2$ l **c)** $V = 0{,}5$ l



Missä astioista on suurin lämpötila?

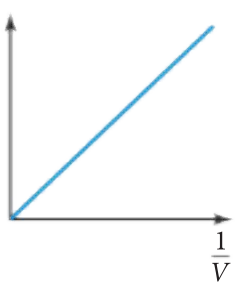
136. Kilpapyörän renkaan tilavuus on 1,9 litraa. Ilmanpaine renkaassa on 3 120 hPa. Kuinka suuri on saman ilmamäärän tilavuus normaalipaineessa ja samassa lämpötilassa? Esim. 1, 2 ja 3

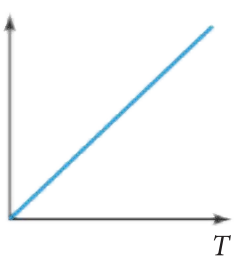
137. Kuumana kesäpäivänä auton sisällä oleva lämpötila oli mittarin mukaan 42,0 °C. Kuinka paljon auton sisällä oleva ilmamäärä arviolta muuttui, kun ilmastointilaite jäähdytti sisäilman 22,0 °C:seen? Auton matkustamon tilavuudeksi arvioitiin noin 3,0 m^3. Esim. 5

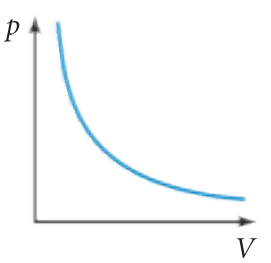
138. Henkilöauton rengas on täytetty 15 °C:n lämpötilassa ja normaalipaineessa 0,26 MPa:n ylipaineeseen. Kuinka suureksi paine kasvaa, kun ilman lämpötila nousee renkaassa 60 °C:seen? Renkaan tilavuus pysyy muuttumattomana. Esim. 6

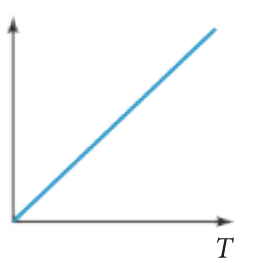
Soveltavat tehtävät

139. Mihin kaasulakeihin oheiset kuvaajat liittyvät?

a) 

b) 

c) 

d) 

140. Sukeltajan hengityslaitteesta irronneen ilmakuplan tilavuus kasvaa kolminkertaiseksi, kun se nousee pintaan. Kuinka syvällä sukeltaja on puhaltanut kuplan? Ilman lämpötila kuplassa pysyy vakiona, ja ilmanpaine veden pinnalla on normaali 1 013 hPa.

141. Oppilastyönä tutkittiin ilman Boylen lain mukaista käyttäytymistä. Painemittari oli kiinnitetty injektioruiskuun. Ruiskun tilavuutta muutettiin mäntää liikuttamalla. Tilavuus luettiin ruiskun asteikosta ja paine mitattiin painemittarilla. Saadut tulokset on esitetty taulukossa.

V (ml)	20	18	16	14	12	10	8	6
p (kPa)	28,58	31,52	34,84	39,22	46,13	54,36	67,06	85,51

a) Piirrä paineen $p = p(V)$ -kuvaaja.
b) Tee taulukkoon sarake ja laske siihen tilavuuden käänteisarvot $\frac{1}{V}$.
c) Piirrä kuvaaja myös $\frac{1}{V}$, p -koordinaatistoon ja päättele kuvaajasta ilman tilavuuden ja paineen välinen riippuvuus.
d) Kuinka suuri paine ruiskussa on, kun tilavuus on 15 ml?

142. Kaasupullon tilavuus on 35 litraa, ja siinä on kaasua 155 baarin paineessa. Kuinka suuri paine pullossa on käytön jälkeen, kun kaasua käytetään normaalipaineisena 265 litraa? Kaasupullon lämpötila pysyy muuttumattomana.

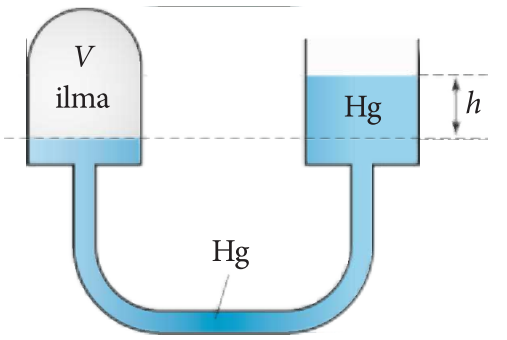
143. Pullon ja siinä olevan ilman lämpötila on +20 °C. Pullo suljetaan ilmatiiviillä korkilla, ja siinä oleva ilma jäähdytetään niin, että sen loppulämpötila on –20 °C. Korkin pinta-ala on 3,6 cm^2. Määritä voima, joka kohdistuu korkkiin, kun pullon tilavuus ei muutu.

144. Polkupyörän renkaan tilavuus on 2,2 litraa. Pumppu on muodoltaan pyöreä, männän halkaisija on 2,4 cm ja pumpun pituus 36 cm. Renkaassa on ylipainetta 2 350 hPa. Kuinka monta pumpullista ilmaa renkaaseen on pumpattava, jotta siihen saataisiin 3 850 hPa:n ylipaine?

145. Boylen lain toteutumista voidaan testata kuvan mukaisella laitteella. Elohopeasäiliön korkeutta muuttamalla paine ilmasäiliössä muuttuu. Eräässä kokeessa saatiin seuraavat mittaustulokset:

h (cm)	5	15
V (cm^3)	18	16

Mikä oli mittauksen aikana vallitseva ilmanpaine?



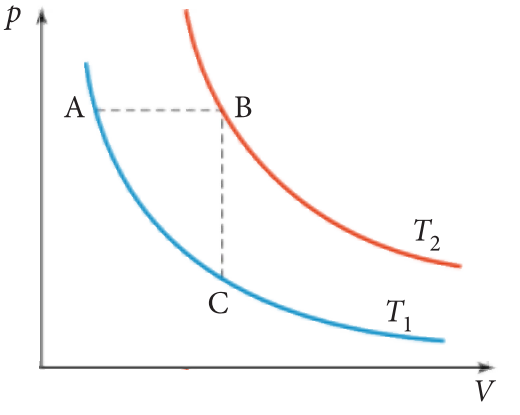
146. Heliumkaasua jäähdytettiin ja samalla mitattiin sen painetta. Tulokset on esitetty taulukossa.

t (°C)	–10	–20	–35	–75	–135	–175
p (kPa)	101,6	94,1	88,5	73,6	49,8	36,3

a) Piirrä kuvaaja, joka esittää kaasun painetta lämpötilan funktiona.
b) Arvioi kuvaajasta absoluuttisen nollapisteen arvo celsiusasteina.

147. Neonkaasun tiheys on 0,90 kg/m^3 normaalissa ilmanpaineessa (1 013 hPa) ja lämpötilassa (0 °C). Kuinka suuri sen tiheys on, kun kaasu puristetaan isotermisesti 0,20 MPa:n paineeseen?

148. Kuvassa on esitetty kaksi isotermiä, jotka on mitattu kaasusysteemin lämpötiloissa T_1 ja T_2. Mitä kaasulle tapahtuu sen siirtyessä
a) tilasta A tilaan B
b) tilasta B tilaan C
c) tilasta C tilaan A?



10 Lämpö on siirtyvää energiaa

Teekupin ja teen muodostamasta avoimesta systeemistä siirtyy lämpöä systeemin ympäristöön. Lopulta systeemin ja ympäristön lämpötilat ovat samat.

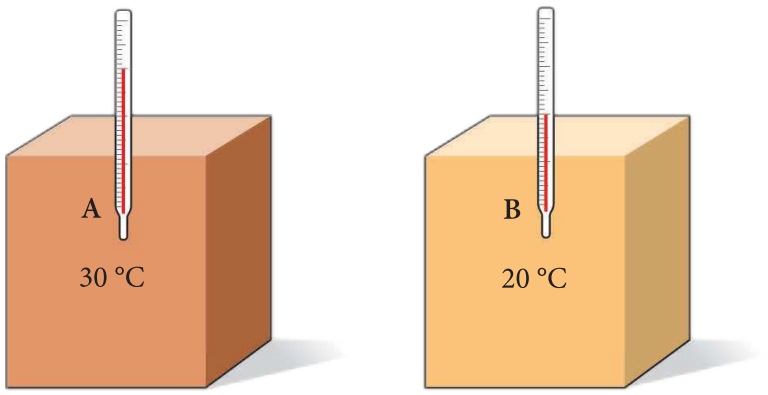
Lämpöopin nollas pääsääntö
Eristetyssä systeemissä lämpötilat tasoittuvat.

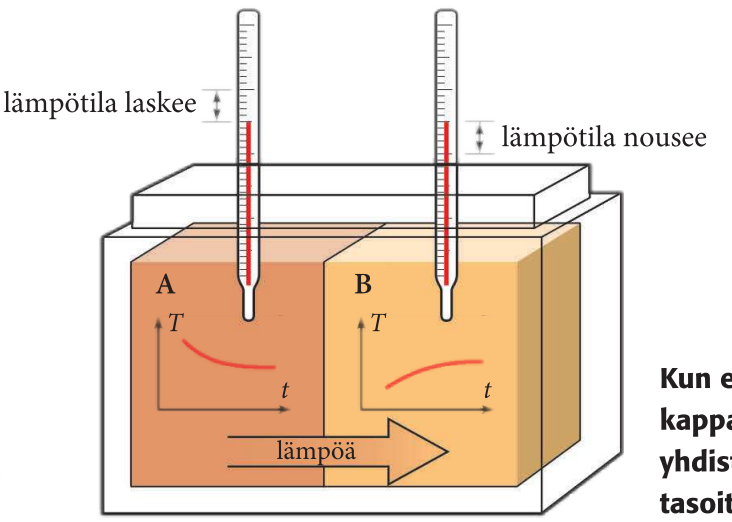
Lämpötilat tasoittuvat

Kuppiin unohtunut tee jäähtyy nopeasti. Energiaa siirtyy teestä kupin ympäristöön johtumalla ja säteilemällä. Jäähtymisnopeus riippuu siitä, paljonko teetä on ja kuinka lämmintä tee on. Mitä enemmän teetä on, sitä kauemmin jäähtyminen kestää. Teen jäähtyessä sen sisäenergia vähenee. Vastaavasti kupin ympäristön sisäenergia kasvaa.

Lämpötilojen tasoittumisesta kannattaa tehdä mittauksia **kalorimetrissa**, joka on eristetty systeemi. Siitä ei poistu ympäristöön energiaa eikä ainetta. Esimerkiksi termoskannua voidaan käyttää kalorimetrinä.

Kun kaksi kalorimetrissa olevaa lämpötiloiltaan erilaista kappaletta asetetaan kosketuksiin keskenään, kuumempi kappale jäähtyy ja kylmempi lämpenee, kunnes kappaleiden lämpötilat ovat samat. Tätä periaatetta sanotaan **lämpöopin nollanneksi pääsäännöksi**. Yleisesti pätee, että energiaa siirtyy aina kuumemmasta kappaleesta kylmempään. Lämpötila määrää siten, mihin suuntaan energia siirtyy.





Kun erilämpöiset kappaleet A ja B yhdistetään, lämpötilat tasoittuvat.

Lämpö
Lämpö on lämpötilaerosta aiheutuvaa siirtyvää energiaa.

Lämpömäärä
$Q = cm\Delta T$,
jossa
c on aineen ominaislämpökapasiteetti,
m on kappaleen massa ja
ΔT on kappaleen lämpötilan muutos.

Ominaislämpökapasiteetti *c*
Ominaislämpökapasiteetti on kullekin aineelle ominainen suure. Se ilmaisee aineen luovuttaman tai vastaanottaman lämpömäärän lämpötilayksikköä ja massayksikköä kohti. Sen arvo on erilainen eri aineilla. Eri aineiden ominaislämpökapasiteetit löytyvät taulukoista.

Lämpömäärä on siirtyvän energian määrä

Teen jäähtymistä tarkasteltaessa voidaan systeemiksi valita kuuma teejuoma ja samassa lämpötilassa oleva teekuppi. Kuumasta teestä siirtyy sen jäähtyessä energiaa systeemin ympäristöön. Tätä lämpötilaerosta aiheutuvaa siirtyvää energiaa sanotaan **lämmöksi**.

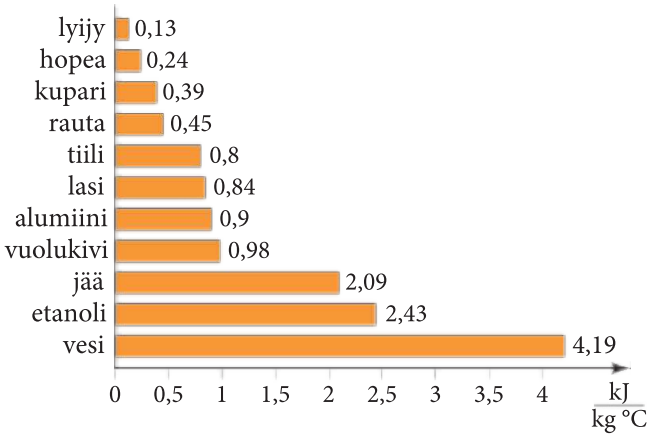
Jos systeemin lämpötilan halutaan muuttuvan ΔT:n verran, tulee systeemin sisäenergian kasvaa tai pienentyä systeemille ominaisen määrän. Tätä lämpötilan muutokseen liittyvää systeemistä toiseen siirtyvää energiamäärää kutsutaan **lämpömääräksi** Q.

Lämpömäärä riippuu energiaa luovuttavan tai vastaanottavan kappaleen massasta m, lämpötilan muutoksesta ΔT lämmön siirtymisen aikana ja siitä, mitä ainetta lämpöä luovuttava kappale on, joten $Q = cm\Delta T$. Aineelle ominaista suuretta c, joka kuvaa energian vastaanotto- ja luovutuskykyä, kutsutaan **ominaislämpökapasiteetiksi**. Aineen ominaislämpökapasiteetti riippuu jonkin verran lämpötilasta.

Ominaislämpökapasiteetin yksikkö saadaan ratkaisemalla ominaislämpökapasiteetti c yhtälöstä $Q = cm\Delta T$. Tällöin saadaan $c = \frac{Q}{m\Delta T}$, joten ominaislämpökapasiteetin SI-järjestelmän mukainen yksikkö on

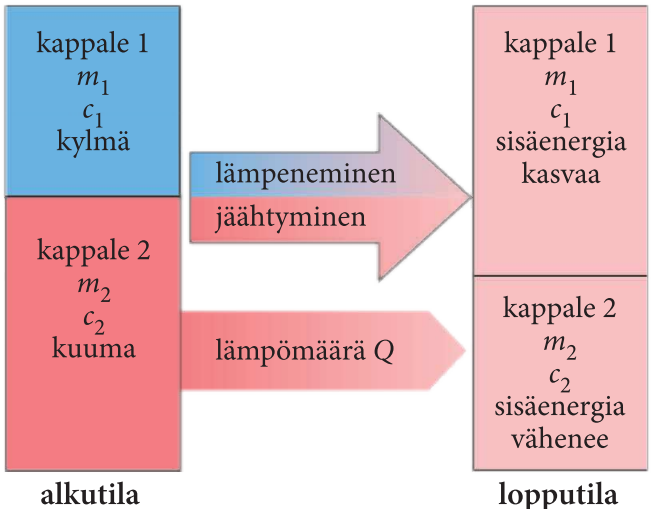
$$[c] = \frac{[Q]}{[m] \cdot [\Delta T]} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}.$$

Lämpömäärän Q suureyhtälössä ΔT on lämpötilan muutos. Koska lämpötilan muutoksen lukuarvo on sama sekä celsiusasteina että kelvineinä, on sama kumpaa lämpötilayksikköä käytetään. Koska celsiusasteet ovat tutumpia, ominaislämpökapasiteetin yksikkönä käytetään usein myös yksikköä $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,°C}}$.



Aineiden ominaislämpökapasiteetit riippuvat aineen rakenneosien välisten kemiallisten sidosten luonteesta. Veden ominaislämpökapasiteetti on erityisen suuri.

Lämmön säilyminen
Eristetyssä syteemissä
$Q_l = Q_v$,
jossa
Q_l on luovutettu lämpömäärä ja
Q_v on vastaanotettu lämpömäärä.



Kappale 1 lämpenee ja kappale 2 jäähtyy.

$Q_v = c_1 m_1 \Delta T_1$ $\qquad$ $Q_l = c_2 m_2 \Delta T_2$

Lämmetessään kappale 1 vastaanottaa energiaa ja jäähtymisessään kappale 2 luovuttaa energiaa toiselle kappaleelle. Sisäenergian muutokset ovat yhtä suuret.

Kappaleen lämpökapasiteetti

$$C = \frac{Q}{\Delta T},$$

jossa
Q on kappaleen luovuttama tai vastaanottama lämpömäärä ja ΔT on kappaleen lämpötilan muutos.
Lämpökapasiteetti C on kullekin kappaleelle ominainen suure. Se ilmaiseen kappaleen luovuttaman tai vastaanottaman lämpömäärän lämpötilayksikköä kohti.

Vettä käytetään kaukolämmityksessä, sillä vesi varastoi paljon energiaa.

Lämpötilat tasoittuvat lämmön siirtyessä

Kun eri lämpötilassa olevat kappaleet ovat yhteisen lämpöeristeen sisällä, systeemi on eristetty ja sen kokonaisenergia säilyy. Kappaleiden lämpötilat tasoittuvat, jolloin kuumemman kappaleen sisäenergia pienenee sen luovuttaman energian määrällä. Samalla kylmemmän kappaleen sisäenergia kasvaa vastaanotetun energian määrällä.

Kuuma kappale luovuttaa lämpömäärän Q_l, ja sen sisäenergia pienenee tällä määrällä. Kylmä kappale vastaanottaa lämpömäärän Q_v. Kun systeemi on eristetty eli energiaa ei poistu systeemin ulkopuolelle, luovutettu lämpömäärä on yhtä suuri kuin vastaanotettu lämpömäärä: $Q_l = Q_v$.

Kuuman ja kylmän kappaleen keskinäistä energian vaihtoa voidaan kuvata energiakaaviolla ja siirtyvän energian määrä voidaan laskea lämpömäärän määritelmästä $Q = cm\Delta T$.

Kappaleen lämpökapasiteetti määritetään kokeellisesti

Aina ei tiedetä tarkkaan, mistä aineesta kappale koostuu, joten sen luovuttamaa tai vastaanottamaa lämpömäärää ei voida laskea suureyhtälöllä $Q = cm\Delta T$. Tällaisessa tapauksessa on käytännöllisempää käyttää suuretta **kappaleen lämpökapasiteetti** C, joka mittaa kappaleen kykyä luovuttaa tai vastaanottaa energiaa. Tällöin lämpömäärän yhtälö saa muodon $Q = C\Delta T$. Kappaleen lämpökapasiteetin yksikkö on siten

$$[C] = \frac{[Q]}{[\Delta T]} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}.$$

Kappaleiden ja astioiden lämpökapasiteetit määritetään yleensä kokeellisesti.

Vedellä on suuri ominaislämpökapasiteetti

Veden kyky vastaanottaa ja luovuttaa energiaa on suuri, eli sillä on suuri ominaislämpökapasiteetti. Nestemäisen veden molekyylien välillä on sähköisiä vetysidoksia, joihin energia voi sitoutua. Tämän lisäksi vesimolekyyli voi pyöriä, värähdellä ja edetä. Energiaa sitoutuu myös näihin liikkeisiin. Veden sisäenergia kasvaa, kun veteen siirtyy lämpöä, ja pienenee, kun sitä siirtyy pois.

Vesi soveltuu hyvin energian siirtoon ja varastointiin, koska sillä on suuri ominaislämpökapasiteetti. Veden lämpötila muuttuu vain vähän, vaikka siihen siirtyy runsaasti energiaa. Vastaavasti sen lämpötila laskee vain vähän, vaikka siitä vapautuu runsaasti energiaa. Esimerkiksi talojen lämmitysputkistoissa vesi on käyttökelpoinen ja halpa lämmönkuljetin. Suuri osa ihmisestä on vettä, mikä auttaa pitämään kehon lämpötilan vakiona, vaikka ympäristön lämpötila vaihtuisi nopeasti.

Esimerkki 1 — Lämpömäärän laskeminen

Messinkikappaletta, jonka massa on 1,2 kg, lämmitetään 72 °C. Kuinka paljon energiaa lämmittämiseen tarvitaan?

Ratkaisu

$m = 1{,}2$ kg, $\Delta t = 72$ °C, $Q = ?$

Taulukkokirjan mukaan messingin ominaislämpökapasiteetti on $c = 0{,}38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$.

Sijoitetaan annetut massan (m = 1,2 kg) ja lämpötilamuutoksen ($\Delta t = 72$ °C) arvot lämpömäärän yhtälöön $Q = cm\Delta t$, jolloin saadaan

$$Q = 0{,}38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 1{,}2 \text{ kg} \cdot 72 \text{°C}$$

$$= 32{,}832 \text{ kJ} \approx 33 \text{ kJ}.$$

Vastaus

Energiaa tarvitaan 33 kJ.

Huomaa!

1. Jos suureyhtälössä merkitään lämpötilaa T-kirjaimella, tulee yksikkönä käyttää kelviniä. Se on SI-järjestelmän yksikkö. Tällainen tilanne on esimerkiksi silloin, kun sovelletaan kaasuyhtälöitä.
   Kun lämpötilan tai lämpötilan muutoksen yksikkönä on celsiusaste, suureen symbolina käytetään t-kirjainta. Jos on vaara, että lämpötila sekoittuu aikaan, käytetään ajan tunnuksena t-kirjainta ja lämpötilan tunnuksena θ-kirjainta (theeta).
2. Koska 1 °C on suuruudeltaan yhtä suuri kuin 1 K, on lämpötilaero yhtä suuri kelvineissä ja celsiusasteissa ($\Delta T = \Delta t$).

Esimerkki 2 — Luovutettu energia lämpökapasiteetin avulla

Kiukaan lämpökapasiteetti on 90 $\frac{\text{kJ}}{\text{K}}$. Kuinka paljon lämpöä kiuas luovuttaa, jos se jäähtyy 50 °C?

Ratkaisu

$C = 90 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$, $\Delta t = 50$ °C, $Q = ?$

Kun kiuas jäähtyy 50 °C, lämpötilan muutos ΔT on myös 50 K. Luovutetuksi energiaksi saadaan $Q = C\Delta T = 90 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \cdot 50 \text{ K} = 4\,500 \text{ kJ}$.

Vastaus

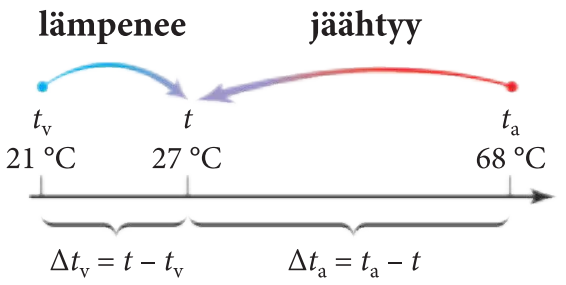
Kiuas luovuttaa lämpöä 4 500 kJ.

Huomaa!

Lämpöopin energialaskuissa lämpötilan muutos on tässä kirjassa aina positiivinen. Laskut perustuvat siihen, että systeemi ottaa vastaan yhtä paljon lämpöä kun toinen systeemi luovuttaa. Tällöin käsitellään lämpömäärien suuruuksia, joita laskettaessa käytetään koko ajan lämpötilan muutosten suuruuksia. Siksi lämpötilan muutos lasketaan aina vähentämällä ylemmästä lämpötilasta alempi. Se, luovuttaako vai vastaanottaako systeemi energiaa, päätellään tilanteesta.

Esimerkki 3 — Lämpökapasiteetti ja ominaislämpökapasiteetti

Alumiinikappale, jonka massa on 0,100 kg ja lämpötila 68 °C, upotetaan kalorimetrissa olevaan veteen. Veden massa on 0,150 kg ja lämpötila 21 °C. Loppulämpötilaksi mitataan 27 °C. Kalorimetrin lämpökapasiteetti on 15 J/°C.
Määritä mittaustulosten perusteella
a) kappaleen lämpökapasiteetti
b) alumiinin ominaislämpökapasiteetti.



Lämpökapasiteetin ratkaiseminen

$C_a \Delta t_a = c_v m_v \Delta t_v + C_k \Delta t_v$

Jakamalla yhtälö puolittain Δt_a:lla saadaan

$$C_a = \frac{c_v m_v \Delta t_v + C_k \Delta t_v}{\Delta t_a}.$$

Otetaan Δt_v yhteiseksi tekijäksi:

$$C_a = \frac{\Delta t_v (c_v m_v + C_k)}{\Delta t_a}.$$

Huomaa!

Taulukkokirjan mukaan alumiinin ominaislämpökapasiteetti on $0{,}90 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$. Poikkeama taulukkoarvosta voi johtua esimerkiksi lämpötilanmittauksen epätarkkuudesta. Lämpökapasiteetin arvo on tässä mittauksessa huomattavan herkkä lämpötilamittauksen tarkkuudelle. Jos loppulämpötilaksi olisi mitattu 26,5 °C, tulos olisi ollut $0{,}85 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$.

Ratkaisu

a) $m_a = 0{,}100$ kg , $t_a = 68$ °C, $m_v = 0{,}150$ kg, $t_v = 21$ °C, $t = 27$ °C, $C_k = 15$ J/°C, $C_a = ?$

Energia säilyy, koska käytetään kalorimetria eli suljettua ja lämpöeristettyä astiaa, jota voidaan pitää eristettynä systeeminä. Silloin alumiinikappaleen luovuttama lämpömäärä Q_a on yhtä suuri kuin veden ja kalorimetrin vastaanottama lämpömäärä $Q_v + Q_k$ yhteensä. Luovutettu energia saadaan yhtälöstä

$Q_a = C_a \Delta t_a$,

jossa

C_a on alumiinikappaleen lämpökapasiteetti ja

Δt_a alumiinikappaleen lämpötilan muutos.

Vastaanotettu lämpömäärä saadaan yhtälöstä

$Q_v + Q_k = c_v m_v \Delta t_v + C_k \Delta t_v$,

jossa

c_v on veden ominaislämpökapasiteetti,

m_v veden massa,

Δt_v veden lämpötilan muutos ja

C_k kalorimetrin lämpökapasiteetti.

Siten $C_a \Delta t_a = c_v m_v \Delta t_v + C_k \Delta t_v$,

josta saadaan

$$C_a = \frac{\Delta t_v (c_v m_v + C_k)}{\Delta t_a}.$$

Sijoittamalla lukuarvot saadaan

$$C_a = \frac{(27\,°\text{C} - 21\,°\text{C}) \cdot \left[4{,}19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 0{,}150\ \text{kg} + 15 \frac{\text{J}}{\text{°C}}\right]}{68\,°\text{C} - 27\,°\text{C}}$$

$$= \frac{6\,°\text{C} \cdot \left[4{,}19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 0{,}150\ \text{kg} + 0{,}015 \frac{\text{kJ}}{\text{°C}}\right]}{41\,°\text{C}} = 0{,}094 \frac{\text{kJ}}{\text{°C}}.$$

b) Alumiinin ominaislämpökapasiteetti c_a saadaan jakamalla alumiinikappaleen lämpökapasiteetti C_a sen massalla m_a:

$$c_a = \frac{C_a}{m_a} = \frac{0{,}094 \frac{\text{kJ}}{\text{°C}}}{0{,}100\ \text{kg}} = 0{,}94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}.$$

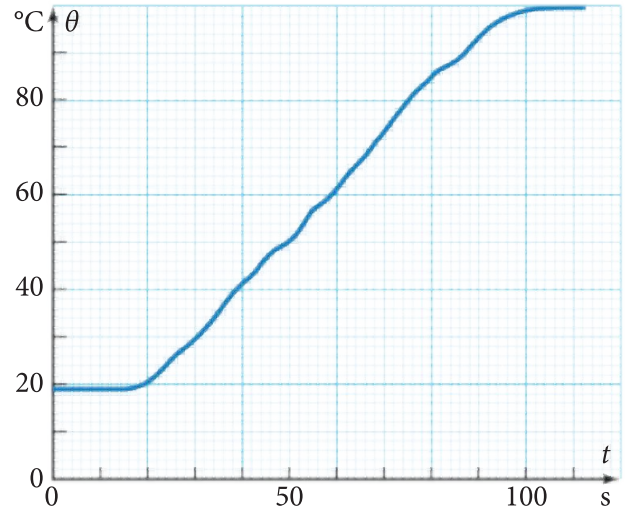
Vastaus

a) Alumiinikappaleen lämpökapasiteetti on $0{,}094 \frac{\text{kJ}}{\text{°C}}$.

b) Alumiinin ominaislämpökapasiteetti on $0{,}94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$.

Esimerkki 4 — Veden ominaislämpökapasiteetti

Vedenkeittimellä lämmitettiin vettä. Lämmityksen aikana vettä sekoitettiin niin, että veteen ei muodostunut lämpötilaeroja. Veden lämpiämistä seurattiin tietokoneeseen liitetyllä lämpötila-anturilla. Mittauksesta saatiin oheiset tulokset.



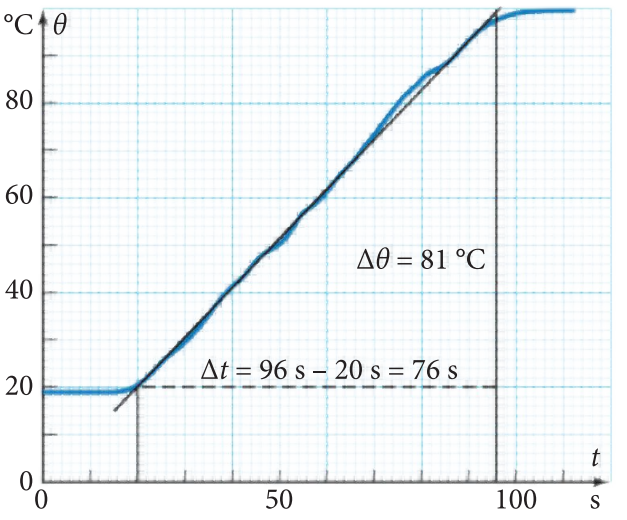
a) Kuvaile lämmitystä graafisen esityksen pohjalta.

b) Laske vedenkeittimen lämmitysteho. Vettä oli 350 ml. Lämmittimen lämpökapasiteetti oletetaan pieneksi ja lämmön siirtyminen laitteen ulkopuolelle merkityksettömäksi.

Ratkaisu

a) Veden lämpiämistä esittävä kuvaaja on lähes suora, joten voidaan olettaa, että lämmitin toimii lähes vakioteholla.

b) Veden massa $m = 0{,}35$ kg. Vedenkeitin luovutti veteen lämpömäärän $Q_l = P\Delta t$.



Veden vastaanottama lämpömäärä $Q_v = cm\Delta\theta$.

Koska lämmittimen lämpökapasiteetti on pieni ja lämmön poistuminen keittimen ulkopuolelle pientä, on $Q_l = Q_v$.

Ratkaistaan teho P:

$$P\Delta t = cm\Delta\theta$$

$$P = \frac{cm\Delta\theta}{\Delta t} = cm\frac{\Delta\theta}{\Delta t}.$$

Piirretään kuvaajaan suora, joka kuvaa lämpötilan kohoamista. $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ on suoran fysikaalinen kulmakerroin. Kuvaajasta saadaan $\Delta t = 96\text{ s} - 20\text{ s} = 76\text{ s}$ ja $\Delta\theta = 100\text{ °C} - 19\text{ °C} = 81\text{ °C}$.

Sijoitetaan tunnetut arvot tehon lausekkeeseen:

$$P = \frac{4{,}19\,\frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 0{,}35\text{ kg} \cdot 81\text{°C}}{76\text{ s}} = 1{,}56298\,\frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

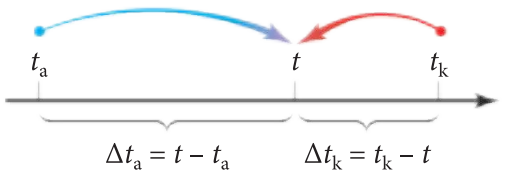
$$\approx 1{,}6\text{ kW}.$$

Vastaus

b) Vedenkeittimen lämmitysteho on 1,6 kW.

Esimerkki 5 — Lämpötilojen tasoittuminen

Retkeilijä juo aamukahvin alumiinisesta kupista. Kupin massa on 120 g, ja sen alkulämpötila on 20,0 °C. Kuppiin kaadetaan 0,200 kg kahvia, jonka lämpötila on 70,0 °C. Mikä on juotavan kahvin lämpötila heti kaatamisen jälkeen?



Loppulämpötilan *t* ratkaiseminen

$c_k m_k (t_k - t) = c_a m_a (t - t_a)$.

Kerrotaan sulut auki

$c_k m_k t_k - c_k m_k t = c_a m_a t - c_a m_a t_a$.

Siirretään loppulämpötilan t sisältämät termit vasemmalle puolelle ja muut oikealle puolelle, jolloin saadaan

$c_a m_a t + c_k m_k t = c_k m_k t_k + c_a m_a t_a$.

Otetaan loppulämpötila t yhteiseksi tekijäksi:

$(c_a m_a + c_k m_k) t = c_k m_k t_k + c_a m_a t_a$.

Jaetaan yhtälön molemmat puolet loppulämpötilan kertoimella:

$$t = \frac{c_k m_k t_k + c_a m_a t_a}{c_k m_k + c_a m_a}.$$

Huomaa!

Kaikki vastaavat tehtävät ratkaistaan käyttämällä energian säilymislakia edellisen esimerkin mukaisesti.

Ratkaisu

$m_a = 0{,}120\ \text{kg}$, $t_a = 20{,}0\ °\text{C}$, $m_k = 0{,}200\ \text{kg}$, $t_k = 70{,}0\ °\text{C}$,

$c_k = 4{,}19\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}}$, $c_a = 910\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}}$, $t = ?$

Aluksi kahvi ja kuppi ovat erillään. Kahvin kaatamisen jälkeen kahvi ja kuppi ovat kosketuksissa ja energiaa siirtyy kahvista kuppiin. Koska alumiini on hyvä lämmönjohde, se lämpenee nopeasti. Prosessin aikana energiaa ei siirry merkittävästi ympäristöön. Niinpä kahvin luovuttama lämpömäärä on yhtä suuri kuin alumiinikupin vastaanottama lämpömäärä, ja lopussa kahvin ja kupin lämpötilat ovat yhtä suuret.

Kahvi koostuu suurimmaksi osaksi vedestä, joten kahvilla on likimäärin sama ominaislämpökapasiteetti kuin vedellä. Kahvin luovuttama lämpömäärä saadaan sen ominaislämpökapasiteetin c_k, massan m_k ja lämpötilamuutoksen Δt_k tulona $Q_k = c_k m_k \Delta t_k$.

Vastaavasti alumiinikupin vastaanottama lämpömäärä saadaan sen ominaislämpökapasiteetin c_a, massan m_a ja lämpötilanmuutoksen Δt_a avulla: $Q_a = c_a m_a \Delta t_a$.

Koska kahvin luovuttama lämpömäärä on yhtä suuri kuin alumiinikupin vastaanottama lämpömäärä, saadaan yhtälö $Q_k = Q_a$.

Siten $c_k m_k \Delta t_k = c_a m_a \Delta t_a$.

Sijoittamalla lämpötilojen lausekkeet saadaan

$c_k m_k (t_k - t) = c_a m_a (t - t_a)$.

Loppulämpötila on $t = \frac{c_k m_k t_k + c_a m_a t_a}{c_k m_k + c_a m_a}$.

Sijoitetaan lukuarvot:

$$t = \frac{4{,}19 \cdot 10^3\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}} \cdot 0{,}200\ \text{kg} \cdot 70{,}0\,°\text{C} + 910\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}} \cdot 0{,}120\ \text{kg} \cdot 20{,}0\,°\text{C}}{4{,}19 \cdot 10^3\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\,°\text{C}} \cdot 0{,}200\ \text{kg} + 910\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}} \cdot 0{,}120\ \text{kg}}$$

$= 64{,}2356\ °\text{C} \approx 64\ °\text{C}$.

Vastaus

Kahvin loppulämpötila on 64 °C.

Tiivistelmä

- Lämpötilat tasoittuvat.
- Lämpömäärä on siirtyvän energian määrä.
- Lämpötilat tasoittuvat lämmön siirtyessä.
- Vedellä on suuri ominaislämpökapasiteetti.

Perustehtävät

149. **a)** Miksi käsitteessä ominaislämpökapasiteetti on etuliite ominais?
b) Miten lämpökapasiteetti ja ominaislämpökapasiteetti eroavat toisistaan?

150. Rautakappaletta, jonka massa on 0,75 kg, lämmitetään 52 °C. Kuinka paljon energiaa lämmittämiseen tarvitaan? Esim. 1

151. **a)** Kuinka monta astetta nousee messinkikappaleen lämpötila, jos siihen siirtyy 42 kJ energiaa. Kappaleen massa on 1,5 kg.
b) Kuinka monta astetta nousisi saamalla energiamäärällä huoneenlämpöinen vesi, jos sen massa on sama kuin a-kohdassa? Esim. 1

152. Ihminen on suurimmaksi osaksi vettä. Laske oma lämpökapasiteettisi.

153. Vettä lämmitetään vedenkeittimessä, jonka teho on 2 000 W. Oletetaan, että keitin on suljettu systeemi.
a) Kuinka paljon energiaa tarvitaan lämmittämään 2,1 desilitraa teevettä 25 °C:sta kiehuvaksi?
b) Kuvaile lämmitysprosessi sanallisesti ja energiakaavion avulla.

154. Vedenkeittimessä lämmitetään 1,2 litraa vettä. Veden alkulämpötila on 15 °C ja loppulämpötila 95 °C. Keittimen teho on 1 200 W, ja sen lämpökapasiteetti on 0,35 $\frac{\text{kJ}}{\text{°C}}$. Oletetaan, että kannun hyötysuhde on 80 %. Laske, kuinka kauan veden lämmittäminen kestää. Esim. 2 ja 4

155. Sekoitetaan 2,0 litraa 72-asteista vettä ja 5,0 litraa 23-asteista vettä kalorimetrissa.
a) Mikä loppulämpötila on?
b) Kuvaile prosessia sanallisesti ja energiakaavion avulla. Esim. 3 ja 5

156. Saunavedeksi halutaan 35-asteista vettä. Kuinka paljon täytyy 9,5 litraan kylmää vettä (lämpötila 15 °C) sekoittaa 93-asteista vettä saunan padasta? Lämpöä ei siirry pois systeemistä. Esim. 3 ja 5

Soveltavat tehtävät

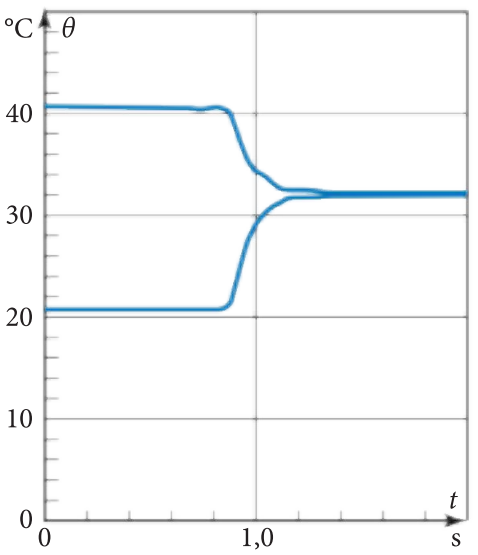
157. Lämpömittari asetetaan 0,250 kg:n vesimäärään. Lämpömittari näyttää lukemaa 46,5 °C. Mikä oli veden lämpötila ennen mittausta, jos mittari näytti aluksi lukemaa 17,6 °C ja mittarin lämpökapasiteetti on 72 $\frac{\text{J}}{\text{°C}}$? Oletetaan, että energiaa ei siirry systeemin ulkopuolelle.

158. Omenoita jäähdytetään 25 °C:sta kuljetusta varten 2,0 °C:seen. Omenoiden keskimääräinen massa on 0,140 kg, ja omenan ominaislämpökapasiteetti on 3 600 $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$.
a) Kuinka paljon lämpöä kukin omena luovuttaa?
b) Vertaa luovutettua energiaa omenan energiasisältöön (1360 kJ/kg).

159. Oheinen taulukko osoittaa, kuinka paljon energiaa (mielivaltainen yksikkö) tarvittiin nostamaan samaa ainetta olevan kolmen erimassaisen kappaleen lämpötilaa. Täydennä taulukko.

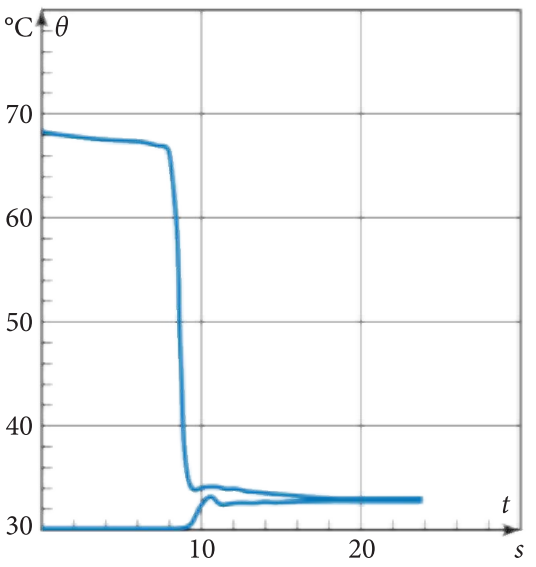
Lämpötilan muutos (°C)	**Kappaleen massa (kg)**		
	0,2	**0,6**	**1,0**
4	9,6	**a)**	48
10	**b)**	72	120
25	60	180	**c)**

160. Eräässä kokeessa mitattiin aluksi lämpötilaa kahdesta vesiastiasta. Vedet kaadettiin kalorimetriin ja lämpötilan mittausta jatkettiin. Toisessa astiassa oli 45 ml kylmää vettä.



a) Kuvaile tapahtumia graafisen esityksen pohjalta.
b) Selvitä, kuinka monta millilitraa vettä toisessa lasissa oli.

161. Kokeessa tutkittiin erään metallin ominaislämpökapasiteettia. Kalorimetriin punnittiin vettä massaltaan sama määrä kuin metallipunnuksen massa. Punnus laitettiin kalorimetriin.

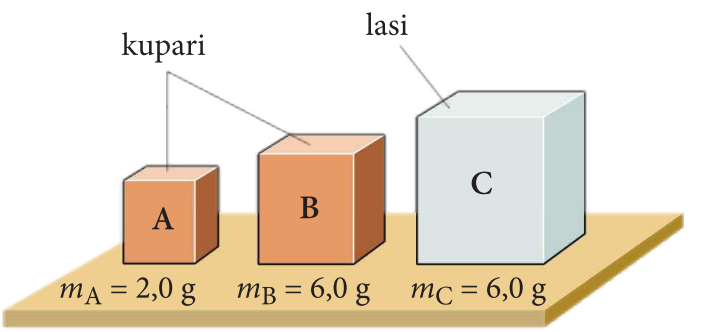


a) Kuvaile tapahtumia graafisen esityksen pohjalta.
b) Selvitä mittaustulosten avulla, mitä metallia kokeessa tutkittiin.

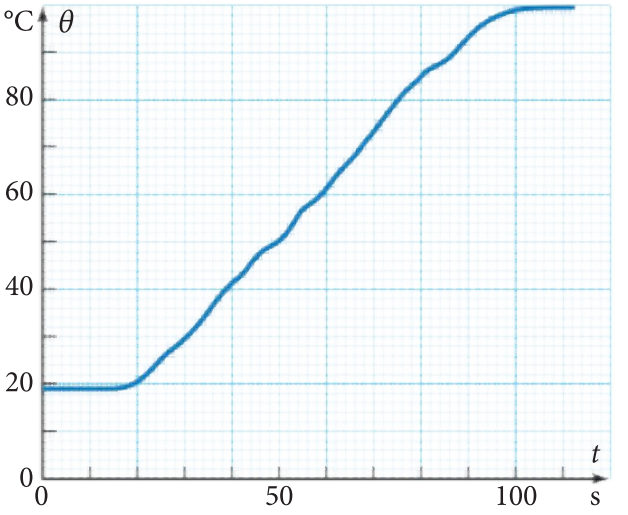
162. Kuinka suuren nopeuden saavuttaisi auto, jonka massa on 1 050 kg, jos sitä kiihdytettäisiin levosta samalla energiamäärällä kuin kuluu yhden vesikilogramman lämmittämiseen nollasta celsiusasteesta sataan celsiusasteeseen?

163. Flunssaisen ihmisen kehon lämpötila nousee 37,0 °C:sta 39,0 °C:seen. Laske, kuinka suuri lämpömäärä tarvitaan tähän lämpötilan nousuun, jos henkilön massa on 80,0 kg ja ihmisen kehon oletetaan koostuvan pääasiassa vedestä.

164. Minkä kappaleen lämpötila nousee eniten, kun niihin tuodaan sama lämpömäärä (14 J)?



165. Vedenkeittimellä lämmitettiin vettä. Lämmityksen aikana vettä sekoitettiin niin, että veteen ei muodostunut lämpötilaeroja. Veden lämpiämistä seurattiin tietokoneeseen liitetyllä lämpötila-anturilla. Mittauksesta saatiin oheiset tulokset.



Määritä vedenkeittimen ja sen sisällä olevan veden muodostaman systeemin lämpökapasiteetti. Keittimen teho on 1600 W.

166. Hahmottele graafinen esitys mittaustuloksista. Lämpötilaa mitattiin ensin kahdesta vesiastiasta. Toisen vesimäärä oli 2 l ja lämpötila 25 °C, toisen 1 l ja 50 °C. Vedet kaadettiin kalorimetriin ja lämpötilan mittausta jatkettiin vielä niin kauan, että lämpötilat tasoittuivat.

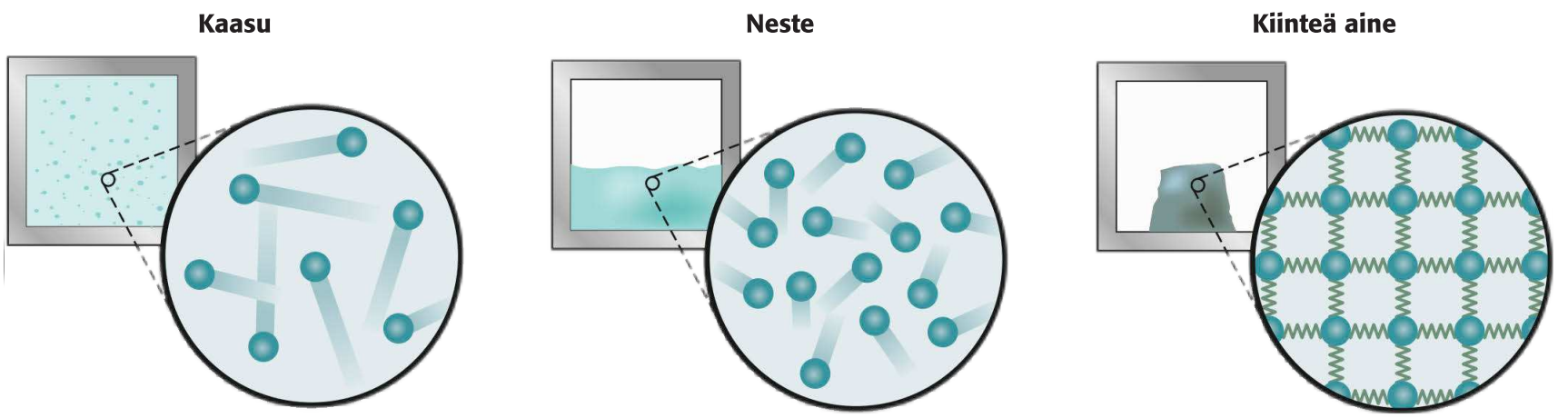
11 Aineella on kolme olomuotoa

Olosuhteet ja rakenneosien väliset sidokset määräävät aineen olomuodon

Kaikilla alkuaineilla on kolme **olomuotoa** eli faasia: **kiinteä**, **neste** ja **kaasu**. Useimmat alkuaineet ovat huoneenlämpötilassa kiinteitä. Nesteitä ovat ainoastaan elohopea ja bromi. Jalokaasut ja vety, typpi, happi, kloori ja fluori ovat kaasuja.

Kiinteiden aineiden rakenneosat ovat niin tiiviisti sitoutuneet toisiinsa kemiallisilla sidoksilla, että ne eivät pysty vaihtamaan paikkaansa. Rakenneosat värähtelevät tasapainoasemansa ympärillä sitä voimakkaammin, mitä korkeampi kappaleen lämpötila on. Myös nesteissä rakenneosien välillä on sidoksia, mutta rakenneosat voivat vaihtaa paikkaansa. Tämän vuoksi neste ottaa astian muodon. Mitä korkeampi nesteen lämpötila on, sitä nopeammin sen rakenneosat liikkuvat. Kaasun rakenneosien välillä ei ole kemiallisia sidoksia, joten rakenneosat voivat liikkua vapaasti. Tästä aiheutuu kaasun ominaisuus täyttää astia tasaisesti. Kaasun rakenneosien liike on etenemistä ja pyörimistä. Liike nopeutuu lämpötilan kasvaessa.

Useimmat alkuaineet ovat huoneenlämmössä kiinteitä. Esimerkiksi elohopea on neste ja kloori kaasu. Rauta on huoneenlämmössä kiinteää.



Rakenneosat ovat sitoutuneet eri tavalla eri olomuodoissa.

Olomuodonmuutoslämpö
Olomuodon muutoksessa aineen sisäenergia muuttuu, vaikka lämpötila pysyy vakiona.

Olomuodon muutokset
Olomuodon muutoksia ovat sulaminen ja jähmettyminen, höyrystyminen ja tiivistyminen sekä sublimoituminen ja härmistyminen.

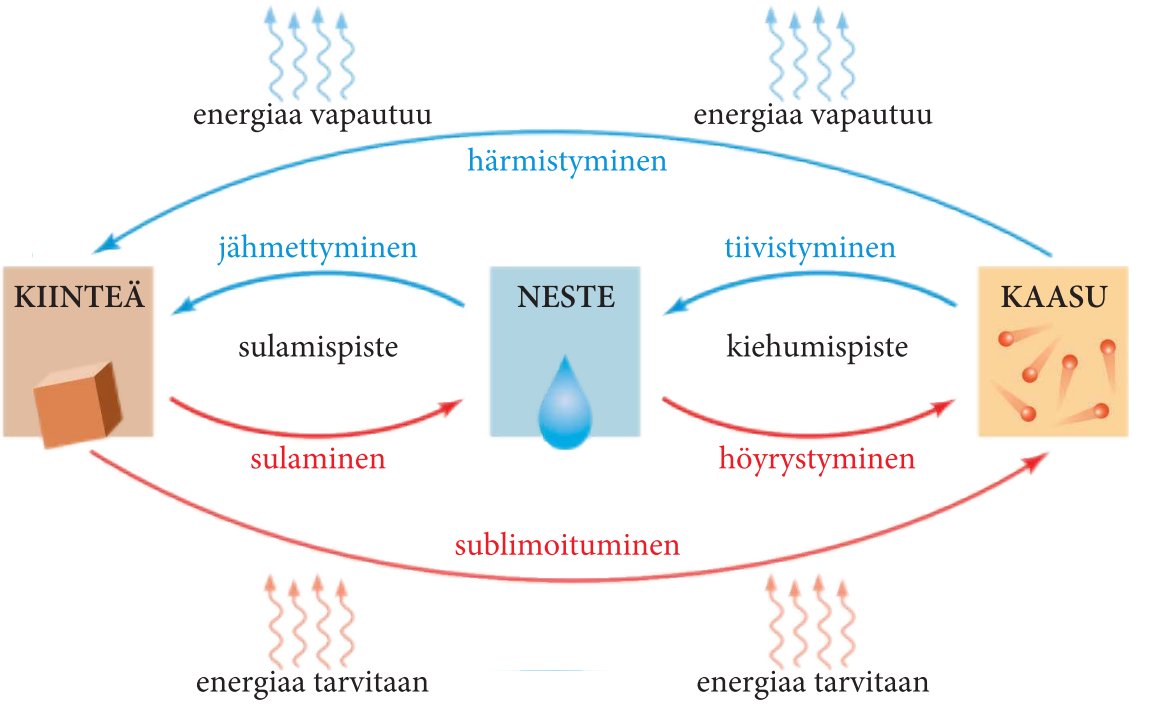
Lämpötila ei muutu olomuodon muutoksissa

Kun nolla-asteisia pieneksi pilkottuja jääpaloja lämmitetään, niiden lämpötila ei aluksi nouse, jos systeemiä sekoitetaan koko ajan. Jää vain sulaa. Kun kaikki jää on sulanut, veden lämpötila alkaa nousta. Kun vesi kiehuu normaalissa ilmanpaineessa, sen lämpötila pysyy sadassa asteessa, vaikka veteen siirtyy koko ajan lisää energiaa. Kaikki energia kuluu veden olomuodon muuttamiseen nesteestä höyryksi.

Kiinteä aine muuttuu nesteeksi **sulamispisteessä**, joka on aineelle ominainen, paineesta riippuva lämpötila. Jos aineesta poistuu energiaa, aine muuttuu tässä lämpötilassa nesteestä kiinteäksi aineeksi. Vastaavasti neste muuttuu kaasuksi **kiehumispisteessä**. Se on kullekin aineelle ominainen, paineesta riippuva lämpötila.

Olomuodon muutoksissa kappaleen lämpötila ei muutu, vaikka siihen siirtyy energiaa tai siitä siirtyy energiaa ympäristöön. Siirtyvä lämpö muuttaa kappaleen sisäenergiaa. Tästä sisäenergian muutoksesta käytetään nimitystä **olomuodonmuutoslämpö** eli **latentti lämpö**. Latentti tarkoittaa piilevää. Nimitys viittaa siihen, että olomuodon muutokseen liittyvä energia ei näy aineen lämpenemisenä. Energia on ”piilossa” aineen rakenneosien energiana.

Olomuodon muutos voi tapahtua tietyssä paineessa ja lämpötilassa kumpaankin suuntaan sen mukaan, ottaako aine vastaan energiaa vai luovuttaako se sitä. Molemmissa tapauksissa siirtyvä energiamäärä on täsmälleen yhtä suuri.



Olomuodon muutoksissa sitoutuu tai vapautuu energiaa. Sulaminen, höyrystyminen ja sublimoituminen vaativat ulkopuolista energiaa. Vastaavasti jähmettyminen, tiivistyminen ja härmistyminen vapauttavat energiaa. Tarvittava energia tai vapautuva energia voi siirtyä joko lämpönä tai työnä.

Energiaa sitoutuu ja vapautuu olomuodon muutoksissa

Aineen sulaminen vaatii energiaa. Sama määrä energiaa vapautuu, kun aine jähmettyy kiinteäksi. Kappaleen sulattamiseen tarvittavaa energiaa kutsutaan **sulamislämmöksi** Q_s. Sulamislämpö riippuu kappaleen massasta ja aineesta, josta kappale on tehty, eli $Q_s = sm$. **Ominaissulamislämpö** s on kullekin aineelle ominainen vakio, joka ilmaisee sulamiseen tarvittavan energiamäärän aineen massayksikköä kohti. Koska $s = \frac{Q_s}{m}$, ominaissulamislämmön yksikkö on

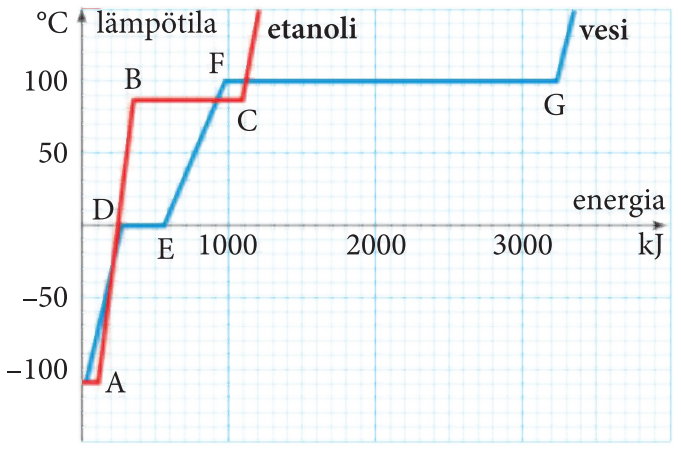
$$[s] = \frac{[Q_s]}{[m]} = 1\,\frac{\text{J}}{\text{kg}}.$$

Sulamislämpö
$Q_s = sm$,
jossa
s on aineen ominaissulamislämpö ja
m on kappaleen massa.

Jotta aine höyrystyisi, siihen tulee siirtyä tietty määrä energiaa. Sama energiamäärä vapautuu, kun kyseinen aine tiivistyy takaisin nesteeksi. Aineen höyrystymiseen tarvittavaa energiamäärää kutsutaan höyrystymislämmöksi Q_h. Höyrystymislämpö riippuu kappaleen massasta ja aineesta, eli $Q_h = rm$. **Ominaishöyrystymislämpö** r ilmaisee höyrystymiseen tarvittavan energiamäärän aineen massayksikköä kohti. Ominaishöyrystymislämmön yksikkö on

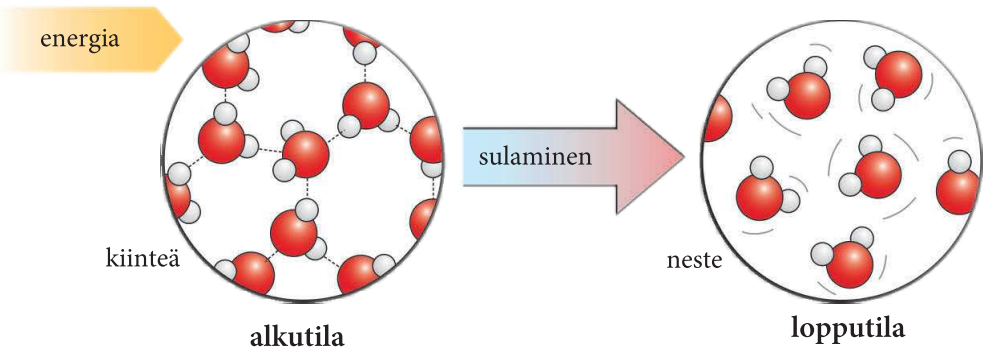
$$[r] = \frac{[Q_h]}{[m]} = 1\,\frac{\text{J}}{\text{kg}}.$$

Höyrystymislämpö
$Q_h = rm$,
jossa
r on aineen ominaishöyrystymislämpö ja
m on kappaleen massa.



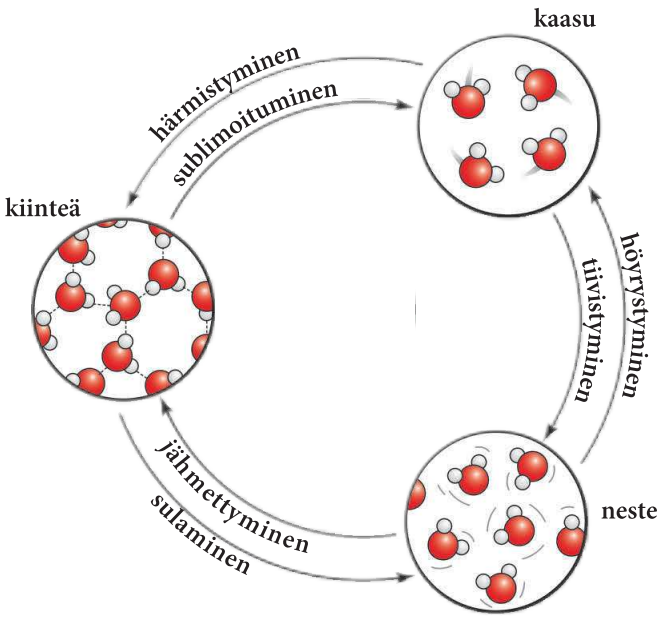
Veden (1 kg) ja etanolin (1 kg) lämpötilojen riippuvuus niihin tuodusta energiasta. Kuvasta nähdään, että veden höyrystyminen (väli F–G) vaatii huomattavasti enemmän energiaa kuin etanolin höyrystyminen (väli B–C).

Sulamis- ja höyrystymisprosessissa kappaleen lämpötila ei muutu. Siksi sulamislämmön tai höyrystymislämmön yhtälössä ei ole lämpötilan muutosta ΔT.



$\Delta U = Q_s = sm$

Aineen sisäenergia kasvaa sulamisessa sulamislämmön verran. Sama määrä energiaa vapautuu aineen jähmettyessä.



Aineen sisäenergia olomuodon muutoksessa
Olomuodon muutoksessa aineeseen tuleva tai aineesta poistuva energia muuttaa rakenneosien potentiaalienergiaa.

Mikromallit selittävät olomuodon muutokset

Kiinteän aineen rakenneosien värähtely kasvaa, kun aineeseen siirtyy energiaa ympäristöstä. Aineen lämpötila nousee. Rakenneosien keskimääräiset etäisyydet kasvavat ja lopulta kemialliset sidokset eivät kykene enää pitämään rakenneosia omilla paikoillaan. Rakenneosat alkavat liikkua toistensa ohi, ja aineen rakenne rikkoutuu. Kiinteä aine muuttuu nesteeksi sulamispisteessä, joka on aineelle ominainen lämpötila.

Olomuodon muutoksessa aineen lämpötila ei muutu, vaikka energiaa tuodaan siihen koko ajan lisää. Sitä vastoin kappaleen sisäenergia kasvaa, kun kappaleeseen tuodaan energiaa. Sisäenergia on aineen rakenneosien liike- ja potentiaalienergioiden summa. Lämpötilan muuttuminen muuttaa rakenneosien lämpöliikettä. Koska lämpötila ei muutu olomuodon muutoksen aikana, ei rakenneosien lämpöliikekään muutu. Tuotava energia menee siis rakenneosien potentiaalienergian muutokseen. Kun rakenneosien potentiaalienergiat kasvavat, osat irtautuvat toisistaan ja rakenne rikkoutuu.

Vastaavasti kiehumispisteessä aineen rakenneosien nopeus on kasvanut niin suureksi, että niiden väliset kemialliset sidokset katkeavat lopullisesti ja rakenneosat pääsevät liikkumaan vapaasti aineen ympäristöön. Aine muuttuu nesteestä kaasuksi. Kun aine kiehuu, tuotava energia menee rakenneosien potentiaalienergian lisäämiseen. Rakenneosien liike-energia ei muutu olomuodon muutoksen aikana.

Koska olomuodon muuttuessa aineen rakenne rikkoutuu, olomuodon muuttamiseen tarvitaan huomattavan paljon energiaa. Aineen lämpötilaa onkin helpompi nostaa kuin rikkoa aineen rakennetta.

Auringon säteilyenergia saa lumen sulamaan keväällä.

Esimerkki 1 — Olomuodonmuutoslämpö

a) Kuinka paljon energiaa tarvitaan, kun 50,0 g 0-asteista jäätä sulatetaan?
b) Kuinka paljon energiaa tarvitaan, kun 50,0 g 100-asteista vettä höyrystetään?
c) Kuinka paljon vettä voitaisiin lämmittää 0 °C:sta 100 °C:seen tuolla energialla?

Ratkaisu

a) $m = 50{,}0\ \text{g},\ t = 0\ °\text{C}\ ,\ Q_s = ?$

Taulukon mukaan jään ominaissulamislämpö on $s = 333\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Siten

$$\begin{aligned} Q &= sm \\ &= 333\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0{,}050\ \text{kg} \\ &= 16{,}65\ \text{kJ} \approx 17\ \text{kJ}. \end{aligned}$$

b) $m = 50{,}0\ \text{g},\ t = 100\ °\text{C},\ Q_h = ?$

Taulukon mukaan veden ominaishöyrystymislämpö on $r = 2\ 260\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Siten

$$\begin{aligned} Q &= rm \\ &= 2260\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0{,}050\ \text{kg} \\ &= 113\ \text{kJ} \approx 110\ \text{kJ}. \end{aligned}$$

c) $Q = cm\Delta t$

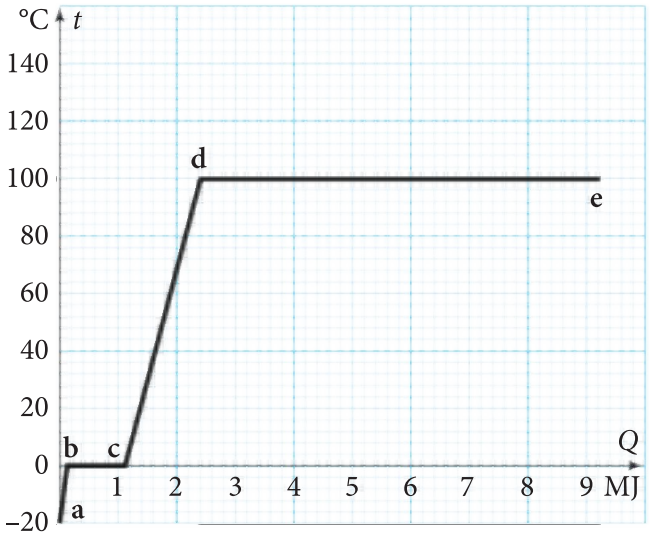
$$\begin{aligned} m = \frac{Q}{c\Delta t} &= \frac{113\ \text{kJ}}{4{,}19\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\ °\text{C}} \cdot 100\ °\text{C}} \\ &= 0{,}2697\ \text{kg} \\ &\approx 270\ \text{g}. \end{aligned}$$

Vastaus

a) Energiaa tarvitaan 17 kJ.
b) Energiaa tarvitaan 110 kJ.
c) Vettä voitaisiin lämmittää 270 g.

Esimerkki 2 — Jäästä vesihöyryksi

Jääkappaleen massa on 3,0 kg ja alkulämpötila –20 °C. Jäätä lämmitetään, ja sen lämpötila muuttuu alla olevan diagrammin mukaan. Selitä, mitä eri vaiheissa tapahtuu, ja laske kussakin vaiheessa tarvittava energiamäärä.



Ratkaisu

Välillä a–b jää (kiinteä vesi) lämpenee.

Lämpenemiseen tarvittava energia saadaan jään ominaislämpökapasiteetin $c_{jää} = 2{,}1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$, massan $m = 3{,}0$ kg ja lämpötilanmuutoksen $\Delta t = 20$ °C avulla:

$$Q = c_{jää} m \Delta t$$
$$= 2{,}1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 3{,}0 \text{ kg} \cdot 20 \text{ °C} = 126 \text{ kJ}.$$

Välillä b–c jää sulaa, jolloin lämpötila on vakio.

Sulamiseen tarvittava energia saadaan jään ominaissulamislämmön $s_{jää} = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ ja massan tulona:

$$Q_s = s_{jää} m$$
$$= 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 3{,}0 \text{ kg} = 999 \text{ kJ} \approx 1\,000 \text{ kJ}.$$

Välillä c–d nestemäinen vesi lämpenee.

Lämmittämiseen tarvittava energia saadaan veden ominaislämpökapasiteetin $c_{vesi} = 4{,}19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$, massan $m = 3{,}0$ kg ja lämpötilamuutoksen $\Delta t = 100$ °C avulla:

$$Q = c_{vesi} m \Delta t$$
$$= 4{,}19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 3{,}0 \text{ kg} \cdot 100 \text{ °C} \approx 1260 \text{ kJ}.$$

Välillä d–e vesi höyrystyy vakiolämpötilassa.

Höyrystymiseen tarvittava energia saadaan veden ominaishöyrystymislämmön $r_{vesi} = 2\,260 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ ja massan tulona:

$$Q_h = r_{vesi} m$$
$$= 2\,260 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 3{,}0 \text{ kg} = 6\,780 \text{ kJ}.$$

Lasketut energian arvot ovat luettavissa kuvaajasta.

Vastaus

a) Väli a–b: $Q = 126$ kJ.
b) Väli b–c: $Q_s = 1\,000$ kJ.
c) Väli c–d: $Q = 1\,260$ kJ.
d) Väli d–e: $Q_h = 6\,780$ kJ.

Esimerkki 3 — Lämpötilojen tasoittuminen

Oppilas jäähdytti virvoitusjuomaa sekoittamalla siihen jääkuutioita. Kuinka paljon jäätä tulee lisätä, jos oletetaan, että kaikki jää sulaa ja seoksen loppulämpötila on 0 °C? Virvoitusjuoman massa on 250 g ja alkulämpötila 25 °C, ja jään alkulämpötila on –20 °C. Systeemi voidaan olettaa eristetyksi.

Ratkaisu

$c_v = 4{,}190\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$, $m_v = 0{,}250$ kg, $t_v = 25$ °C, $t = 0$ °C, $c_j = 2{,}1\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$, $t_j = -20$ °C ja $s_j = 333\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, $m_j = ?$

Virvoitusjuoma luovuttaa lämpöä. Lämpömäärä saadaan kertomalla virvoitusjuoman ominaislämpökapasiteetti c_v, massa m_v ja lämpötilanmuutos $\Delta t_v = t_v - t$:

$$Q_v = c_v m_v \Delta t_v.$$

Tapahtumassa jää lämpenee ja sulaa yhtä aikaa. Prosessi voidaan kuitenkin jakaa osiin siten, että tarkastellaan ensin jään lämpenemistä ja sitten sulamista.

Jään lämpenemiseen 0-asteiseksi tarvitaan lämpöä $Q_j = c_j m_j \Delta t_j$, jossa c_j on jään ominaislämpökapasiteetti, m_j massa ja Δt_j lämpötilanmuutos $\Delta t_j = t - t_j$.

Jään sulamiseen tarvittava lämpömäärä $Q_{s,j}$ saadaan jään ominaissulamislämmön s_j ja sen massan m_j tulona: $Q_{s,j} = s_j m_j$.

Virvoitusjuoman luovuttama lämpömäärä on energian säilymislain mukaan (eristetty systeemi) yhtä suuri kuin jään vastaanottama lämpömäärä:

$$Q_v = Q_j + Q_{s,j}$$

$$c_v m_v \Delta t_v = c_j m_j \Delta t_j + s_j m_j,$$

josta saadaan

$$m_j = \frac{c_v m_v (t_v - t)}{c_j (t - t_j) + s_j}.$$

Sijoittamalla lukuarvot saadaan

$$m_j = \frac{4{,}190\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 0{,}250\ \text{kg} \cdot (25\,°\text{C} - 0°\text{C})}{2{,}1\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot (0\,°\text{C} - (-20\,°\text{C})) + 333\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\approx 0{,}070\ \text{kg} = 70\ \text{g}.$$

Vastaus

Jäätä tulee lisätä 70 g.

Ratkaistaan m_j

$c_v m_v \Delta t_v = c_j m_j \Delta t_j + s_j m_j$

Ottamalla jään massa m_j yhteiseksi tekijäksi saadaan

$c_v m_v \Delta t_v = (c_j \Delta t_j + s_j) m_j$.

Kysytty jään massa m_j saadaan jakamalla yhtälö puolittain lausekkeella $(c_j \Delta t_j + s_j)$. Siten jään massan lauseke on

$$m_j = \frac{c_v m_v \Delta t_v}{c_j \Delta t_j + s_j}$$

$$m_j = \frac{c_v m_v (t_v - t)}{c_j (t - t_j) + s_j}.$$

Tiivistelmä

- Rakenneosien väliset sidokset ratkaisevat olomuodon.
- Lämpötila ei muutu olomuodon muutoksissa.
- Energiaa sitoutuu ja vapautuu olomuodon muutoksissa.
- Mikromallit selittävät olomuodon muutokset.

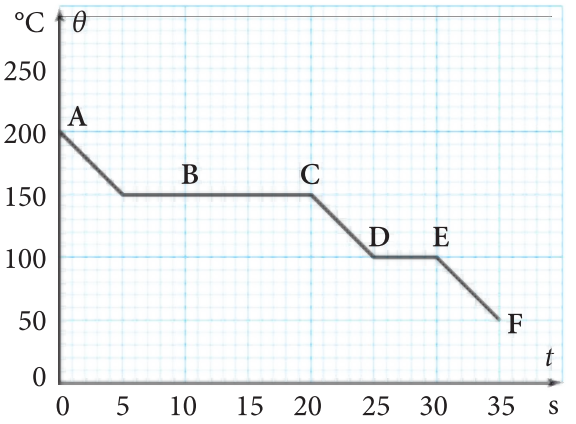
Perustehtävät

167. Oheinen kuvaaja esittää erään aineen jäähtymistä.

a) Mikä on aineen kiehumispiste?

b) Mitä tapahtuu välillä D–E?

c) Miksi väli D–E on lyhyempi kuin B–C? Esim. 2



168. Kahteen kappaleeseen tuodaan sama lämpömäärä. Kerro, miksi niiden lämpötilat eivät välttämättä muutu yhtä paljon.

169. Kuumepotilaan lämpötilaa voidaan joskus laskea alkoholikääreillä. Alkoholia hierotaan potilaan niskaan, käsiin ja selkään. Miksi toimenpiteestä on apua?

170. Mansikan kukat paleltuvat, jos lämpötila laskee –4 °C:seen. Viljelijät suihkuttavat hallan uhatessa ohuen vesikerroksen kukille, jotta ne eivät paleltuisi. Mihin menetelmä perustuu?

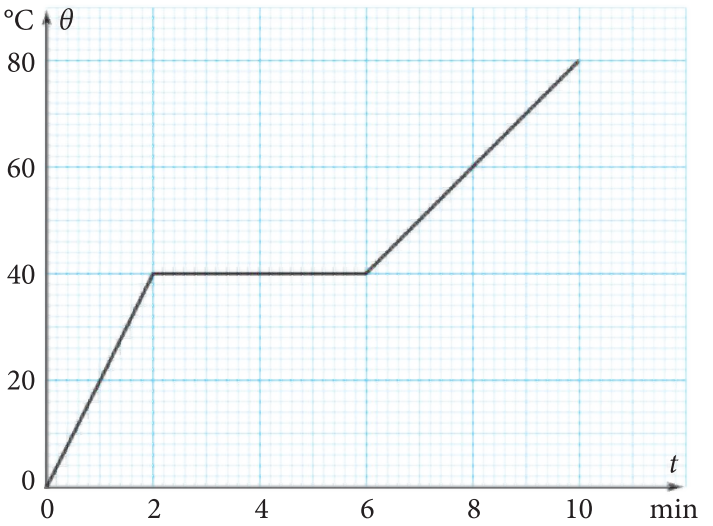
171. Kuinka paljon 100-asteista vettä voidaan höyrystää 4 500 kJ:lla energiaa?

172. Oheinen kuvaaja osoittaa, miten kappaleen lämpötila muuttui, kun siihen siirtyi energiaa vakioteholla 40 kJ minuutissa. Kappale oli aluksi kiinteässä olomuodossa alkulämpötilan ollessa 0 °C.

a) Mitä tapahtuu hetkellä 2 min?

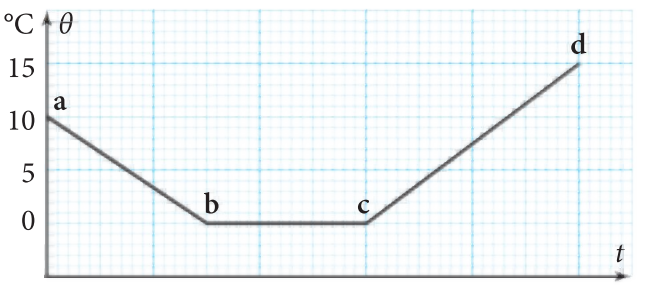
b) Mitä tapahtuu hetkellä 6 min?

c) Piirrä vastaava kuvaaja, jos sama määrä energiaa siirtyy kappaleeseen kaksinkertaisella teholla. Esim. 2

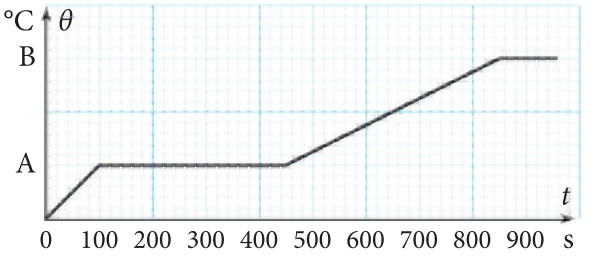


173. Juomalasissa on 10-asteista vettä, ja pudotat lasiin 0-asteisen jääkuution. Veden lämpötila muuttuu oheisen kuvaajan mukaan. Mitä tapahtuu välillä

a) a–b **b)** b–c **c)** c–d? Esim. 2



174. Laboratoriossa lämmitettiin vakioteholla 1,0 W vettä, jonka massa oli 1,0 g. Vesi oli aluksi jäätä. Lämpötila nousi ensin 105 sekuntia, pysyi vakiona hetkeen 440 s ja sitten nousi, kunnes aika oli 860 s.

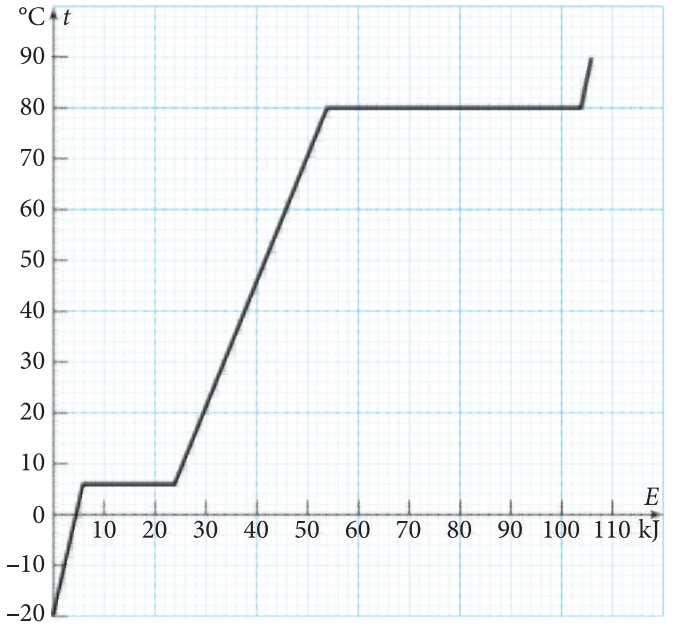


a) Mikä lämpötila on pisteessä A?
b) Mikä lämpötila on pisteessä B?
c) Kuinka paljon lämpöä siirtyi välillä 0–105 s?
d) Kuinka paljon jään lämpötila nousi välillä 0…105 s?
e) Laske annettujen tietojen perusteella jään ominaislämpökapasiteetti.
f) Kuinka paljon energiaa tarvitaan sulattamaan 1,0 g jäätä?
g) Kuinka suuri on jään ominaissulamislämpö?
h) Laske annettujen tietojen perusteella veden ominaislämpökapasiteetti.
i) Vettä lämmitetään edelleen samalla teholla, kun se on saavuttanut 100 °C:n lämpötilan. Kuinka kauan kestää höyrystää puolet vedestä, jos veden ominaishöyrystymislämpö on 2,26 MJ/kg? Esim. 2

Soveltavat tehtävät

175. Ihmisen lepoteho, eli teho, jolla ihminen tuottaa lämpöä levossa ollessaan, on 30 W. Kuinka paljon vettä ihminen haihduttaa vuorokaudessa, jos veden höyrystymislämpö 33 °C:ssa on 2 423 kJ/kg? Oletetaan, että lämpö käytetään hien haihduttamiseen. Miten tuloksen perustella suhtaudut ohjeeseen, että ihmisen tulisi juoda päivässä vähintään litra vettä?

176. Termospullon pohjalla on 125 g erästä orgaanista ainetta lämpötilassa –20 °C. Sitä aletaan lämmittää hitaasti sähkövastuksen avulla, ja lämpötilaa mitataan termistorilla. Alla olevassa kuviossa on esitetty tämä lämpötila termospulloon viedyn sähköenergian funktiona.



a) Tulkitse lämpötilan kuvaaja.
b) Määritä aineen sulamispiste ja kiehumispiste.
c) Määritä aineen ominaissulamislämpö ja ominaishöyrystymislämpö.
(Yo syksy 2001, teht. 4)

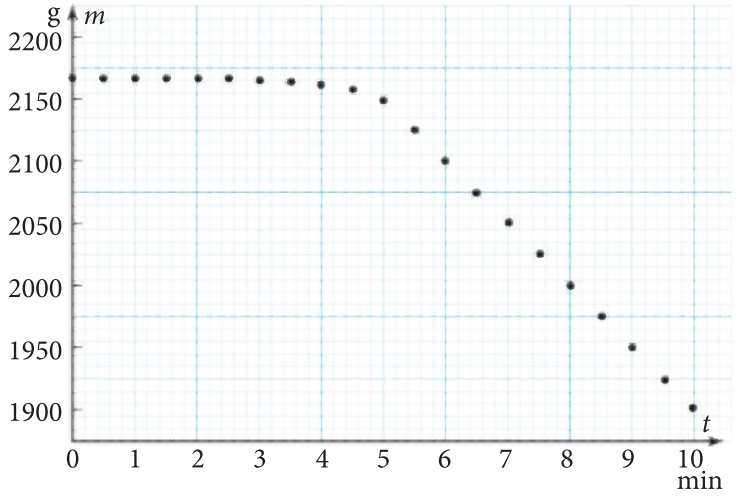
177. **a)** Miksi keittolevyllä olevassa kattilassa kiehuvan veden lämpötila ei nouse, vaikka levyn virtakytkin on maksimiasennossaan?
b) Miksi jääkaapista otetun virvoitusjuomapullon ulkopintaan tiivistyy vettä?
c) Miksi nestekaasupullo jäähtyy, kun siitä otetaan kaasua? (Yo kevät 2003, teht. 11)

178. **a)** Kuinka paljon energiaa tarvitaan sulattamaan 0,70 kg jäätä?
b) Kuinka paljon tinaa sulatettaisiin samalla energiamäärällä? Lämpötila on molemmissa tilanteissa kyseessä olevan aineen sulamispiste.

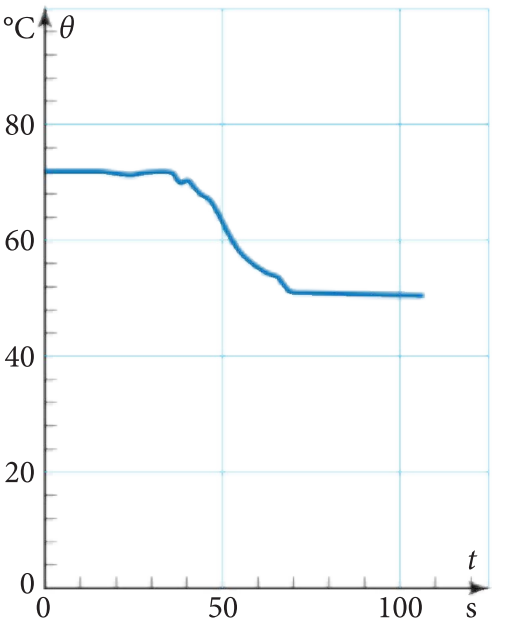
179. Astiassa on 55-celsiusasteista vettä 5,5 kg. Siihen lisätään 4,5 kg jäätä, jonka lämpötila on 0 °C. Mikä systeemin loppulämpötila on, kun systeemi on asettunut termiseen tasapainoon? Astian lämpökapasiteetti on pieni.

180. Termospullossa on 0,60 kg vettä, jonka lämpötila on 25 °C. Pulloon kaadetaan 0,41 kg jääpaloja, joiden lämpötila on –8,0 °C, ja sekoitetaan. Kuinka paljon jäätä jää sulamatta? Kuinka pitkän ajan kuluttua jää on kokonaan sulanut, kun ympäristöstä siirtyy pulloon lämpövirta 11 kJ/h? Termospullon lämpökapasiteetti on 0,15 kJ/°C.
(Yo kevät 2000, teht. 4)

181. Vedenkeittimen teho on 2 025 W. Keitin asetetaan digitaaliselle keittiövaa'alle, jolloin vaaka näytti lukemaa 725 g. Tämän jälkeen keittimeen kaadettiin vettä, jonka lämpötila oli 20 °C, ja kansi jätettiin auki. Keitin kytkettiin toimintaan, ja vaa'an lukema rekisteröitiin puolen minuutin välein. Saatiin oheisen kuvaajan mukaiset tulokset. Määritä kuvaajan perusteella veden ominaislämpökapasiteetti ja ominaishöyrystymislämpö. Jos tulokset poikkeavat taulukkoarvoista, niin miksi?
(Yo kevät 1999, teht. 4)



182. Oheisessa kuviossa on tulokset mittauksesta, jossa 0-asteinen jäänpala laitettiin kalorimetrissa olevaan lämpimään veteen. Vettä oli kalorimetrissa 85 ml.



a) Kuvaile tapahtumaa graafisen esityksen avulla.
b) Kuinka suuri jäänpalan massa oli?

12 Aineen olomuoto riippuu paineesta ja lämpötilasta

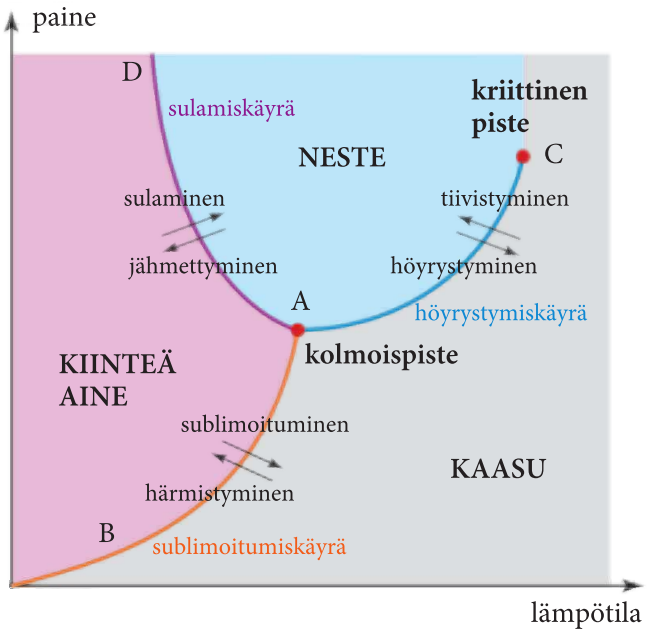
Painekattila nopeuttaa ruoan valmistusta, sillä vesi siinä kiehuu noin 125 celsiusasteessa.

Paine vaikuttaa sulamis- ja kiehumispisteisiin

Vesi on huoneenlämmössä nestemäistä, mutta ulkolämpötilan laskiessa nollaan celsiusasteeseen vesi alkaa jäätyä. Jäätiköiden alla jää kuitenkin sulaa alle nollassa celsiusasteessa. Paine vaikuttaa jään sulamispisteeseen. Kovassa paineessa jään sulamispiste on alle 0 °C. Tämä mahdollistaa suurien jäätiköiden ”virtaamisen”.

Monien ruokien valmistaminen nopeutuu ratkaisevasti, kun käytetään painekattilaa. Painekattilan paine on noin kaksinkertainen verrattuna ilmanpaineeseen. Vesi kiehuu tässä paineessa noin 125 celsiusasteessa. Yleisemminkin aineen olomuoto riippuu lämpötilasta ja paineesta.

Jäätikön painon aiheuttaman paineen vuoksi jää sulaa alle 0 celsiusasteessa. Tällöin jäätikkö lähtee virtaamaan.



Aineen olomuoto riippuu lämpötilasta ja paineesta. Eri olomuotoja esittäviä alueita rajoittavat tasapainokäyrät: sulamis-, sublimoitumis- ja höyrystymiskäyrä. Käyrät kohtaavat kolmoispisteessä.

Faasikaavio kuvaa aineen olomuotoja eri paineissa ja lämpötiloissa

Aineen olomuotoa eri paineissa ja lämpötiloissa kuvataan **faasikaaviolla.** Vaaka-akselilla esitetään lämpötila ja pystyakselilla paine. Jokainen olomuoto – kiinteä aine, neste ja kaasu – esitetään faasikaaviossa omana alueena. Kukin olomuoto on **dynaamisessa tasapainossa** omalla alueellaan. Dynaaminen tasapaino merkitsee sitä, että jos aine on jossakin muussa olomuodossa, se muuttuu aluetta vastaavaan olomuotoon.

Eri olomuotoja vastaavia alueita erottaa toisistaan kolme **tasapainokäyrää: sublimoitumiskäyrä, sulamiskäyrä** ja **höyrystymiskäyrä**. Tasapainokäyrät voidaan määrittää kokeellisesti. Esimerkiksi sulamiskäyrä saadaan mittaamalla aineen sulamispiste eri paineissa.

Tasapainokäyrät kohtaavat kolmoispisteessä

Tasapainokäyriltä luetaan, missä paineessa ja lämpötilassa olomuodon muutokset tapahtuvat. Esimerkiksi sulamiskäyrältä voidaan lukea se lämpötila ja paine, jossa jähmettyminen ja sulaminen tapahtuvat. Sulamiskäyrää vastaavilla paineen ja lämpötilan arvoilla aine voi olla sekä kiinteänä aineena että nesteenä. Tällöin sanotaan, että kiinteä aine ja neste ovat **tasapainossa**. Tasapainokäyrästä nähdään myös, miten paineen muuttuminen vaikuttaa sulamispisteen arvoon. Myös muilla tasapainokäyrillä olomuodot ovat tasapainossa. Esimerkiksi höyrystymiskäyrällä neste ja kaasu ovat tasapainossa. Höyrystymiskäyrältä voidaan lukea myös paine ja lämpötila, jossa tiivistyminen ja höyrystyminen tapahtuvat.

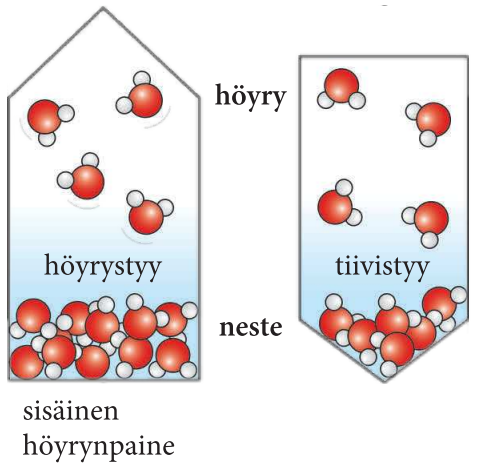
Eri olomuotoja rajoittavat tasapainokäyrät kohtaavat jokaiselle aineelle ominaisella paineen ja lämpötilan arvolla. Tätä paineen ja lämpötilan yhdistelmää sanotaan **kolmoispisteeksi**. Kolmoispisteessä ainetta voi siis olla samanaikaisesti kaikissa kolmessa olomuodossa. Puhtaiden aineiden kolmoispisteiden paineet ja lämpötilat ovat luonnonvakioita. Veden kolmoispisteen lämpötila 0,01 °C on valittu kelvinasteikon toiseksi peruspisteeksi, 273,16 K.

Höyrystymiskäyrä päättyy **kriittiseen pisteeseen** C. Jos kaasumaisen aineen lämpötila on kriittistä lämpötilaa korkeampi, se ei enää nesteydy, vaikka painetta kasvatetaan kuinka suureksi tahansa. Ainetta kutsutaan silloin **kaasuksi**. Olomuodon muutos vaatii, että lämpötila laskee kriittisen lämpötilan alapuolelle. Jos kaasumaisen aineen lämpötila on alhaisempi kuin kriittinen lämpötila, ainetta sanotaan **höyryksi**. Höyry nesteytyy, kun kaasun painetta nostetaan.

Kolmoispiste
Kolmoispisteen lämpötilassa ja paineessa kaikki kolme olomuotoa ovat tasapainossa keskenään.
Kiehumis- ja sulamispiste
Kiehumis- ja sulamispiste tarkoittavat tiettyä lämpötilaa tietyssä paineessa.
Kolmois- ja kriittinen piste
Kolmois- ja kriittinen piste tarkoittavat tiettyä painetta ja lämpötilaa.

Olomuodonmuutoslämpötila
kiehumispiste, neste- ja kaasufaasi tasapainossa
sulamispiste, kiinteä ja nestefaasi tasapainossa
sublimoitumispiste, kiinteä ja kaasufaasi tasapainossa

Haihtuminen
Haihtumista tapahtuu kaikissa lämpötiloissa nesteen pinnalta.



Höyrystyminen ja tiivistyminen ovat tasapainossa. On saavutettu dynaaminen tasapainotila.

Nesteen sisäinen höyrynpaine
Nesteen sisäinen höyrynpaine kuvaa nesteen höyrystymisvoimakkuutta.

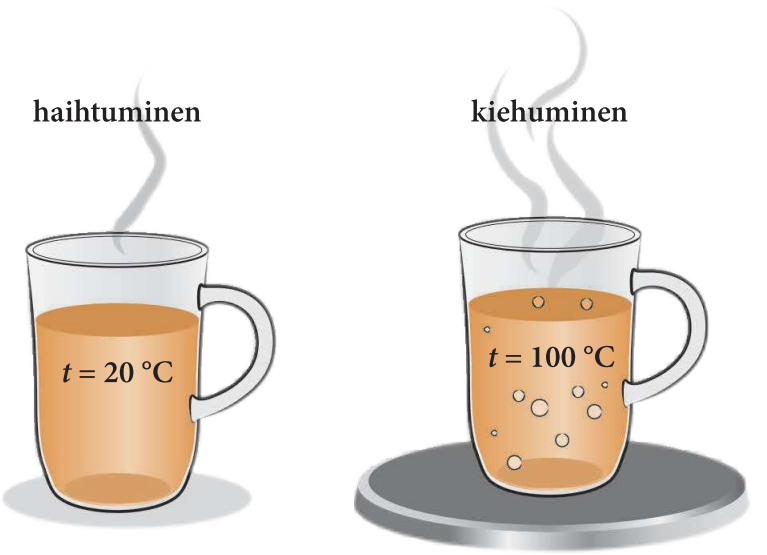
Kiehuminen
Kiehuminen tapahtuu lämpötilassa, jossa nesteen sisäinen höyrynpaine on yhtä suuri kuin ulkoinen paine.

Höyrystyminen tapahtuu kahdella tavalla

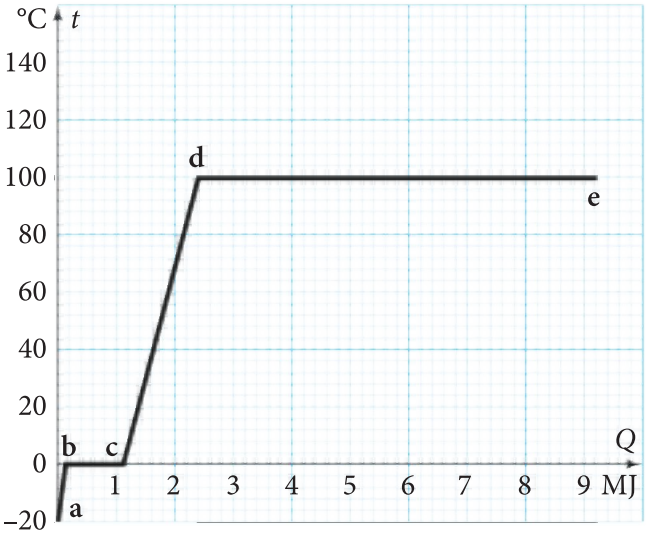
Avoimeen lasiin jäänyt vesi näyttää häviävän muutamassa päivässä. Liedelle kiehumaan unohtunut teevesi häviää kattilasta nopeammin. Molemmissa tapauksissa vesi höyrystyy vesihöyryksi. Kaikki nesteet voivat höyrystyä sekä **kiehumalla** että **haihtumalla**. Haihtuminen tapahtuu nesteen pinnalta. Haihtuminen ei edellytä, että neste on kiehumispisteessä, vaan haihtumista tapahtuu kaikissa lämpötiloissa.

Nesteen vapaalta pinnalta haihtuu höyryä, josta osa tiivistyy takaisin nesteeksi. Takaisin tiivistyminen on sitä voimakkaampaa, mitä enemmän höyryä pinnan yläpuolella on. Kun astia peitetään kannella, höyry ei pääse enää kulkeutumaan pois ja sen määrä lisääntyy, kunnes astiassa saavutetaan **dynaaminen tasapainotila**: tiivistyminen on yhtä nopeaa kuin haihtuminen. Silloin astian ilmatilassa höyry on **kylläistä** ja astiassa olevan höyryn paine on saavuttanut arvon, jota sanotaan **kylläisen höyryn paineeksi**. Ilmatilassa on silloin höyryä niin paljon kuin siihen mahtuu. Kylläisen höyryn paine riippuu lämpötilasta. Faasikaaviossa höyry on kylläinen höyrystymiskäyrän kaikilla arvoilla.

Nesteen sisäinen höyrynpaine on aina yhtä suuri kuin pinnan yläpuolelle muodostuvan kylläisen höyryn paine. Jos nesteen höyrynpaine on matala, höyrystymistä tapahtuu ainoastaan nesteen pinnalta. Jos nesteen sisäinen höyrynpaine on yhtä suuri tai suurempi kuin nesteeseen kohdistuva ulkoinen paine, höyryä muodostuu kaikkialla nesteessä eli neste **kiehuu**. Tällöin kaasukuplia kehittyy kaikkialla nesteessä.



Neste höyrystyy haihtumalla ja kiehumalla.



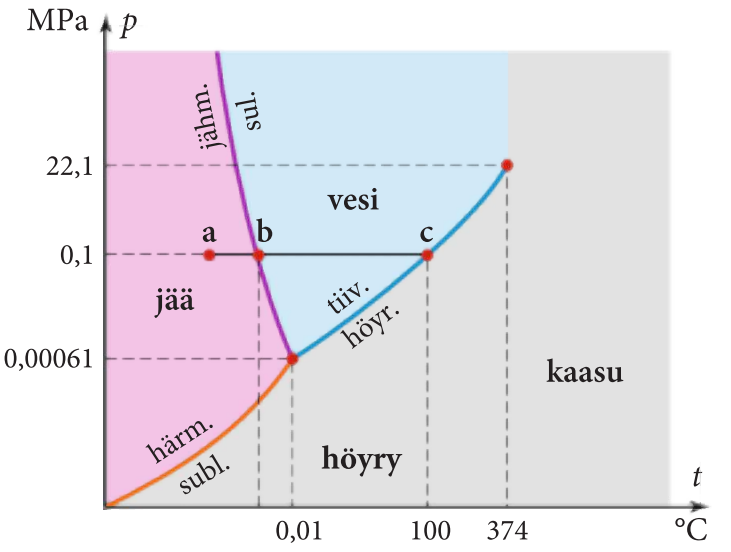
Jään lämmittäminen sata-asteiseksi vesihöyryksi vaatii systeemiin ulkoa tuotua energiaa.

Samaa tapahtumaa kuvataan eri kaavioilla

Jään lämmittäminen sata-asteiseksi vesihöyryksi vaatii ulkoa systeemiin tuotavaa energiaa eli lämmittämistä. Oheisessa kaaviossa väli a–b kuvaa jään lämpiämistä sulamispisteeseen. Tarvittava energia voidaan laskea yhtälöstä $Q_1 = c_{\text{jää}} m \Delta t_1$. Välillä b–c havaitaan, että lämpötila pysyy vakiona, vaikka systeemiin tuodaan energiaa. Tästä voidaan päätellä, että jää sulaa välillä b–c. Energia saadaan nyt yhtälöstä $Q_2 = s_{\text{jää}} m$. Välillä c–d nestemäinen vesi lämpenee sata-asteiseksi ja tarvittava energia saadaan yhtälöstä $Q_3 = c_{\text{vesi}} m \Delta t_2$. Välillä d–e lämpötila ei taas muutu, joten vesi kiehuu ja tarvittava energia on $Q_4 = r_{\text{vesi}} m$. Koko prosessiin tarvittava energia on summa $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$.

Samaa tapahtumaa voidaan tarkastella myös faasikaavion avulla. Suora a–c kuvaa jään lämpenemistä sata-asteiseksi höyryksi. Koska lämmittäminen tapahtuu normaali-ilmanpaineessa, paine on vakio eli 1 013 hPa. Pisteessä a jään lämpötila on –20 °C. Kun siirrytään suoraa a–c pitkin oikealle, jää lämpenee. Sulamiskäyrällä pisteessä b jää sulaa. Kun kaikki jää on sulanut, siirrytään suoralla a–c nestemäisen veden alueelle. Välillä b–c vesi lämpenee kiehuvaksi. Höyrystymiskäyrällä pisteessä c vesi kiehuu.

Jos prosessi tapahtuisi vastakkaiseen suuntaan eli kaasu muuttuisi jääksi, vapautuisi sama määrä energiaa kuin tarvittiin jään muuttamiseksi sata-asteiseksi höyryksi.



Energiaa sitoutuu, kun siirrytään vakiopaineessa vasemmalta oikealle.

Ruoho on kosteaa kesäaamuna, sillä ilmassa oleva vesihöyry on tiivistynyt lehtien pintaan.

Suhteellinen kosteus

$$f = \frac{\rho_h}{\rho_{h,max}},$$

jossa

ρ_h on absoluuttinen kosteus ja

$\rho_{h,max}$ on maksimikosteus.

Ilmankosteus on ilmassa höyrynä olevaa vettä

Elokuun aamuna nurmikenttä näyttää ja tuntuu kostealta, vaikka yöllä ei olisi satanut vettä. Vesi on tiivistynyt ilmassa olevasta kosteudesta, kun lämpötila on laskenut ennen auringonnousua.

Ilmankosteus tarkoittaa ilmassa höyrynä olevaa vettä. Veden määrä voidaan ilmoittaa vesihöyryn tiheyden avulla. **Absoluuttiseksi kosteudeksi** sanotaan ilman todellista vesihöyryn tiheyttä ρ_h eli vesihöyryn massaa tilavuusyksikköä kohden. **Maksimikosteus** $\rho_{h,max}$ on vesihöyryn suurin mahdollinen tiheys ilmassa. Maksimikosteus riippuu lämpötilasta. Absoluuttinen kosteus jaettuna maksimikosteudella on **suhteellinen kosteus** *f*. Suhteellinen kosteus ilmoitetaan prosentteina. Jos suhteellinen kosteus on 100 %, vesihöyry on kylläistä.

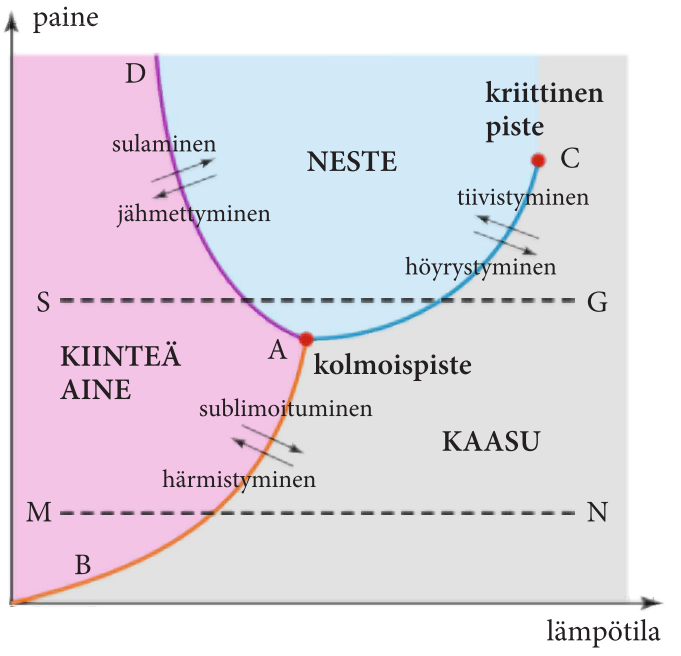
Maksimikosteus pienenee lämpötilan laskiessa. Kylmä ilma voi sisältää vähemmän vesihöyryä kuin lämmin ilma. Kun lämpötila alenee, saavutetaan tietyssä lämpötilassa tilanne, jossa absoluuttinen kosteus tulee yhtä suureksi kuin maksimikosteus eli suhteellinen kosteus on 100 %. Vesihöyry tulee siten kylläiseksi ja alkaa tiivistyä ilmasta erilaisiin pintoihin vesipisaroiksi. Tätä lämpötilaa sanotaan **kastepisteeksi**.

Sisäilman kosteuden pääseminen seinän rakenteisiin saattaa aiheuttaa homeongelmia. Kun ilma jäähtyy seinän sisällä, sen suhteellinen kosteus kasvaa. Tietyssä kohtaa seinän sisällä saavutetaan kastepiste ja kosteus tiivistyy vesipisaroiksi.

Esimerkki 1 — Faasikaavio 1

Tarkastellaan vakiopaineessa olevaa ainetta, jota lämmitetään. Kuvaile, mitä aineelle tapahtuu faasidiagrammissa
a) välillä S–G
b) välillä M–N.

Ratkaisu



a) Välillä S–G aine on aluksi kiinteää, sitten nestettä ja lopulta kaasua.

b) Välillä M–N muutos tapahtuu pienemmässä paineessa, jolloin kiinteä aine sublimoituu suoraan kaasuksi eikä muutu välillä nesteeksi.

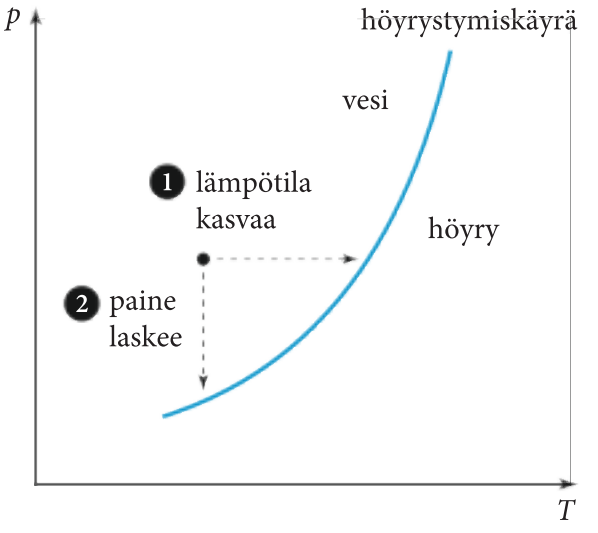
Esimerkki 2 — Faasikaavio 2

Miten tietyssä lämpötilassa ja paineessa oleva vesi saadaan kiehumaan?

Ratkaisu

1) Vesi alkaa kiehua, kun sitä lämmitetään vakiopaineessa niin, että höyrystymiskäyrän määräämä painetta vastaava lämpötila saavutetaan.

2) Toisaalta vesi alkaa kiehua, kun veden painetta alennetaan vakiolämpötilassa niin, että kyseessä olevaa lämpötilaa vastaava kylläisen höyryn paine saavutetaan. Alipaineessa vesi kiehuu alle 100 °C:n lämpötilassa.



Esimerkki 3 — Ilmankosteus

Huoneen ilman suhteellinen kosteus on 60 % ja lämpötila 21 °C.

a) Kuinka suuri absoluuttinen kosteus on?

b) Kuinka paljon ilmassa on vettä, jos huoneen tilavuus on 36 m³?

Ratkaisu

a) $f = 60\ \%$, $t = 21\ °\text{C}$, $V = 36\ \text{m}^3$, $\rho_\text{h} = ?$ Ratkaistaan absoluuttinen kosteus ρ_h suhteellisen kosteuden yhtälöstä $f = \dfrac{\rho_\text{h}}{\rho_\text{h,max}}$.

Tällöin saadaan

$$\rho_\text{h} = f \cdot \rho_\text{h,max}.$$

Taulukkokirjan mukaan 21 °C:n lämpötilassa maksimikosteus $\rho_\text{h,max} = 18{,}3\ \text{g/m}^3$. Sijoittamalla lukuarvot saadaan

$$\begin{aligned}\rho_\text{h} &= 60\ \% \cdot 18{,}3\ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ &= 10{,}98\ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \\ &\approx 11\ \frac{\text{g}}{\text{m}^3}.\end{aligned}$$

b) Massa m saadaan tiheyden ρ_h ja tilavuuden V tulona $m = \rho_h V$.

Sijoitetaan lukuarvot $\rho_h = 10{,}98\ \dfrac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ja $V = 36\ \text{m}^3$:

$$\begin{aligned}m &= \rho_\text{h} V \\ &= 10{,}98\ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 36\ \text{m}^3 \\ &\approx 395\ \text{g} \\ &\approx 0{,}4\ \text{kg}.\end{aligned}$$

Vastaus

a) Absoluuttinen kosteus on 11 g/m³.

b) Ilmassa on 0,4 kg vettä.

Esimerkki 4 — Kastepiste

Mikä on kastepiste edellisen esimerkin tilanteessa?

Ratkaisu

Edellisessä esimerkissä saatiin absoluuttiseksi kosteudeksi 11 g/m³. Katsotaan taulukkokirjasta, missä lämpötilassa se on maksimikosteus. Taulukon mukaan lämpötilassa 12 °C kylläisen vesihöyryn tiheys on 10,66 g/m³. Tehtävän alkuarvojen tarkkuudella kastepiste on siis 12 °C.

Huomaa!

Tulos tarkoittaa sitä, että lämpötilan laskiessa 12 °C:seen kylmiin pintoihin alkaa tiivistyä kastetta.

Vastaus

Kastepiste on 12 °C.

Tiivistelmä

- Paine vaikuttaa sulamis- ja kiehumispisteisiin.
- Faasikaavio kuvaa aineen olomuotoja eri paineissa ja lämpötiloissa.
- Tasapainokäyrät kohtaavat kolmoispisteessä.
- Höyrystyminen tapahtuu kahdella tavalla.
- Samaa tapahtumaa kuvataan eri kaavioilla.
- Ilmankosteus on ilmassa höyrynä olevaa vettä.

Perustehtävät

183. Vastaa lyhyesti.

a) Mitä eroa on haihtumisella ja kiehumisella?

b) Mitä eroa on käsitteillä höyrynpaine, vesihöyryn paine ja kylläisen vesihöyryn paine?

184. Huoneilma on talvella kuivaa. Miksi silmälasit kuitenkin huurtuvat, kun tullaan pakkasesta sisälle?

185. Veden höyrynpaineen lämpötilariippuvuutta tutkittiin kokeellisesti ja saatiin seuraavat mittaustulokset:

t (°C)	p (hPa)
40	73
50	123
60	199
70	311
80	473
90	701
100	1 013
110	1 430
120	1 985

a) Esitä tulokset kuvaajana lämpötila–paine-koordinaatistossa.

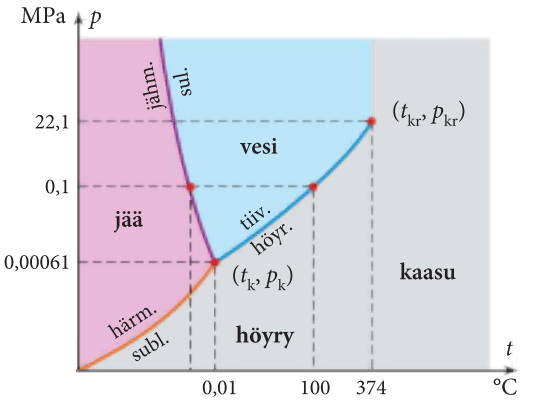
b) Kuinka korkea on veden kiehumispiste 3 500 m:n korkeudessa, jossa ilmanpaine on noin 650 hPa?

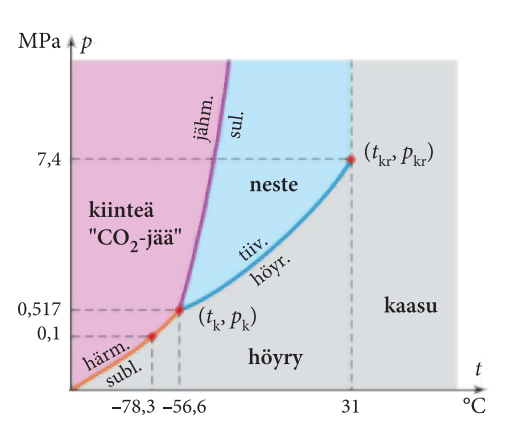
c) Painekattilassa vesi kuumenee vesi kuumenee 115 °C:seen ennen kuin alkaa kiehua. Kuinka suuri paine kattilassa on tällöin?

186. Tarkastele veden ja hiilidioksidin faasikaavioita.

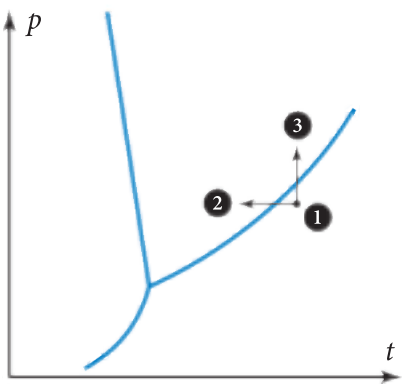
a) Miten ne poikkeavat toisistaan?

b) Miten paineen lisääminen vaikuttaa veden sulamispisteeseen? Entä miten se vaikuttaa hiilidioksidin sulamispisteen? Esim. 1 ja 2





187. Kuvassa on veden faasikaavio.



a) Mitä tapahtuu veden kiehumispisteelle, kun painetta lisätään?

b) Kuvaile, mitä tapahtuu, kun siirrytään pisteestä 1 pisteeseen 2 ja pisteestä 1 pisteeseen 3. Esim. 1 ja 2

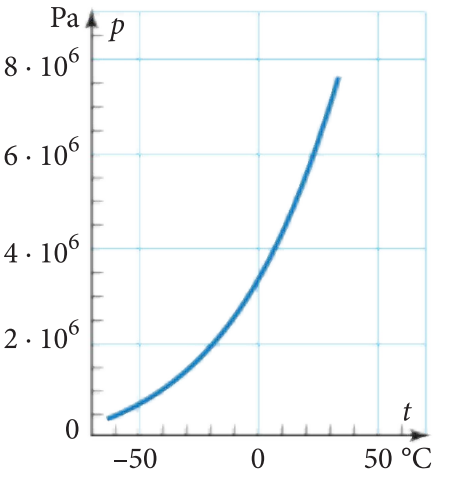
188. Huoneiston tilavuus on 220 m^3. Lämpötila on 21 °C ja suhteellinen kosteus 50 %.

a) Laske ilmassa olevan veden määrä.

b) Kuinka paljon vesihöyryä tarvitaan lisää, jotta suhteellinen kosteus olisi 60 %? Esim. 3

189. Ilman lämpötila on 18 °C ja kastepiste +4 °C. Määritä suhteellinen ja absoluuttinen kosteus. Esim. 3

190. Missä lämpötilassa nestemäinen hiilidioksidi on tasapainossa höyryn kanssa, jos höyrynpaine on $3{,}5 \cdot 10^6$ Pa?



Soveltavat tehtävät

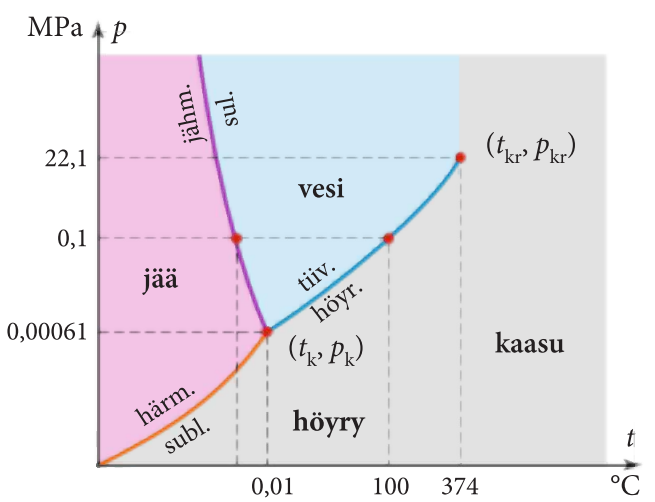
191. Päättele veden faasikaavion avulla, missä olomuodossa vesi on, kun

a) paine on 0,1 MPa ja lämpötila –10 °C

b) paine on 0,1 MPa ja lämpötila 250 °C

c) paine on 0,1 MPa ja lämpötila 100 °C

d) paine on 0,00061 MPa ja lämpötila 0,01 °C.



192. Vettä on tilassa, jossa sen lämpötila on 100 °C ja paine 0,1 MPa.

a) Kuvaile tilaa faasikaavion perusteella.

Miten lämpötilaa tai painetta on muutettava, että

b) vesi olisi kokonaan nestefaasissa

c) vesi olisi kokonaan kaasufaasissa

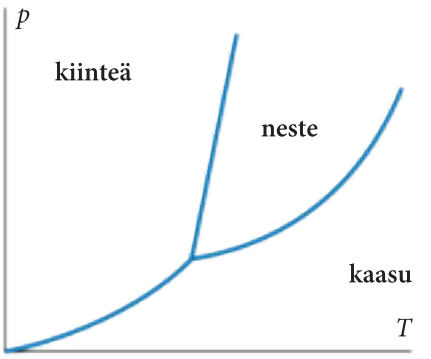
d) vesi olisi kokonaan kiinteässä faasissa?

193. **a)** Piirrä ja merkitse kirjaimella a nuoli kuvaamaan prosessia, jossa aine saadaan kiehumaan vakiopaineessa.

b) Piirrä ja merkitse kirjaimella b nuoli kuvaamaan prosessia, jossa aine saadaan sublimoitumaan vakiopaineessa.

c) Piirrä ja merkitse kirjaimella c nuoli kuvaamaan prosessia, jossa aine saadaan jähmettymään vakiopaineessa.

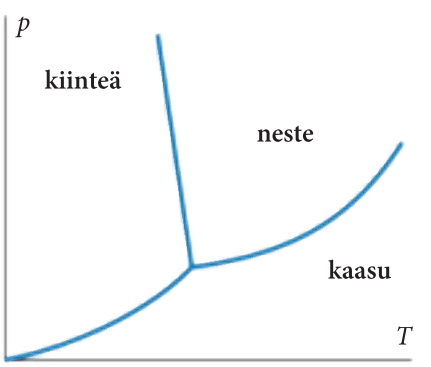
d) Ympyröi kolmoispiste.



194. Kuvassa on veden faasikaavio. Vastaa kaavion perusteella kysymyksiin.

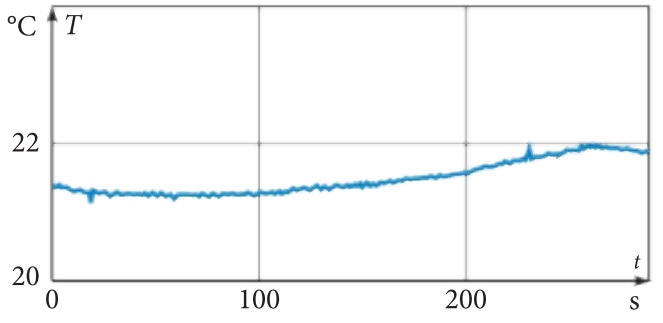
a) Mitä veden kiehumispisteelle tapahtuu, kun kiipeät yhä korkeammalle vuoristossa?

b) Astiassa on vettä (20 °C). Astia pannaan tyhjiökupuun. Mitä vedelle tapahtuu, kun kuvun painetta aletaan pienentää hitaasti?



13 Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö

Kalorimetrissa olevaa vettä voidaan lämmittää tehosekoittimella.



Veden lämpötilaa voidaan muuttaa joko tekemällä mekaanista työtä (vispilöimällä vettä) tai kuumentamalla vesiastiaa. Kuvassa tehosekoittimella sekoitetun veden lämpötilan muutos.

Systeemin sisäenergiaa voidaan muuttaa kahdella tavalla

Tarkastellaan auton ja tien muodostamaa systeemiä. Auton jarruttaessa sen liike-energia pienenee. Systeemin mekaaninen energia pienenee, mutta kokonaisenergia säilyy. Jarrutuksessa kitkavoima tekee työtä ja muuntaa liike-energiaa systeemin sisäenergiaksi. Liike-energiaa muuntuu jarrujen, renkaiden ja tien sisäenergiaksi.

Termoskannussa olevaa vettä voidaan lämmittää sähkövastuksen avulla eli tuomalla lämpöä termoskannun ja veden muodostamaan systeemiin. Myös veden vispilöiminen vatkaimella nostaa veden lämpötilaa. Systeemin sisäenergiaa voidaan siten muuttaa joko siirtyvän lämmön avulla tai voiman tekemällä työllä.

Auton liike-energiaa muuntuu tien, renkaiden ja jarrujen sisäenergiaksi.

Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö
Sisäenergian muutos on
$\Delta U = Q + W$,
jossa
Q on systeemiin tai systeemistä siirtyvä lämpö ja
W on systeemiin vaikuttavan voiman tekemä työ tai systeemin tekemä työ.

Merkkisäännöt
$Q > 0$, kun lämpöä siirtyy systeemiin.
$Q < 0$, kun lämpöä siirtyy pois systeemistä.
$W > 0$, kun ulkoinen voima tekee työtä systeemiin.
$W < 0$, kun systeemi tekee työtä.

Sisäenergia makroskooppisesti tarkasteltuna
Systeemin sisäenergian muutokset ilmenevät lämpötilan, paineen, tilavuuden tai olomuodon muutoksina.

Sisäenergia mikroskooppisesti tarkasteltuna
Sisäenergia on rakenneosien liike- ja potentiaalienergiaa.

Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö määrittelee sisäenergian muutoksen

Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö kertoo, että systeemin sisäenergia muuttuu yhtä paljon kuin siihen siirtyy tai siitä poistuu energiaa lämpönä ja työnä, eli $\Delta U = Q + W$. Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö on yksi energian säilymislain muodoista.

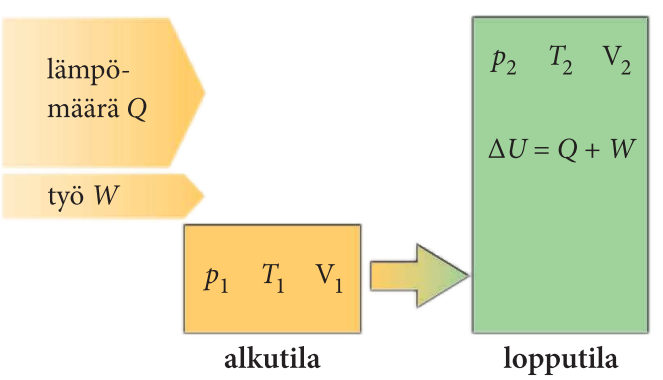
Sisäenergiaan kuuluu nimensä mukaisesti kappaleen sisältämä energia. Mikroskooppisesti tarkasteltuna sisäenergia on aineen rakenneosasten potentiaali- ja liike-energiaa. Kappaleen makroskooppinen liike-energia ja potentiaalienergia eivät ole kappaleen sisäenergiaa.

Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö osoittaa mekaanisen työn ja siirtyvän lämmön yhteyden. Systeemin sisäenergian muutoksen jälkeen ei ole eroa, onko muutos tapahtunut työn vai siirtyvän lämmön takia.

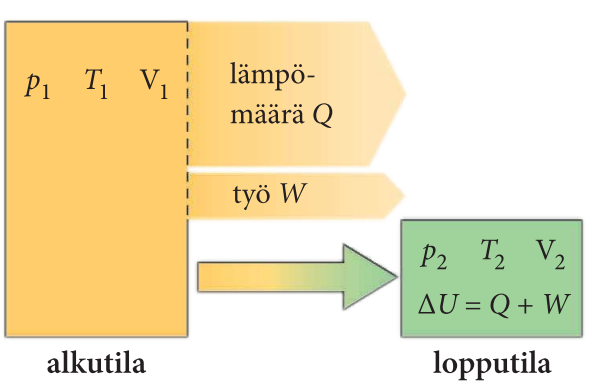
Sisäenergian muutos voidaan havaita

Kappaleen kaikkien rakenneosien potentiaalienergioita ja liike-energioita on mahdoton määrittää, joten kappaleen sisäenergiaa ei pystytä määrittämään. Sisäenergian muutos sen sijaan voidaan määrittää. Sisäenergiaa muuttavat voiman tekemä työ ja lämpö, jotka pystytään mittaamaan ja laskemaan. Sisäenergian muutos havaitaan systeemin lämpötilan, paineen, tilavuuden tai olomuodon muutoksena.

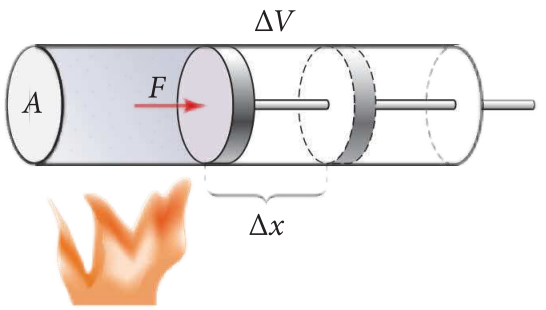
Systeemin sisäenergian muuttumista voidaan havainnollistaa energiakaavioiden avulla. Systeemiin tuotu lämpö ja systeemiin tehty työ kasvattavat systeemin sisäenergiaa. Tämä kuvataan energiakaaviossa laatikon korkeuden kasvuna. Lämpö ja työ eivät ole systeemissä, ne kuvaavat vain energian siirtoa. Systeemistä siirtyvä lämpö ja systeemin eri vuorovaikutuksiin liittyvien voimien tekemä työ pienentää sisäenergiaa. Tämä näkyy energiakaavion laatikon korkeuden pienenemisenä. Kun vesi jäätyy, sen sisäenergia pienenee sulamislämmön verran. Vesi myös laajenee jäätyessään. Jäätyvän veden avulla pystytään halkaisemaan isoja kiviä. Jään ja kiven välinen kosketusvoima tekee työtä ja halkaisee kiven.



Systeemin sisäenergia kasvaa.



Systeemin sisäenergia pienenee.



Laajeneminen isobaarisessa prosessissa
Isobaarisessa prosessissa, jossa paine pysyy samana, laajenemistyö on $W = p\Delta V$, jossa p on paine ja ΔV tilavuuden muutos.

Laajeneva kaasu tekee työtä

Laitetaan huoneenlämpötilassa olevan pullon suulle ilmapallo ja pannaan pullo tämän jälkeen lämpimään vesihauteeseen. Hetken odottelun jälkeen havaitaan, että pallo alkaa täyttyä ilmalla. Lämmennyt kaasu laajenee ja tekee työtä, kun pallo laajenee.

Tarkastellaan systeemiä, jossa kaasusäiliö on suljettu herkkäliikkeisellä männällä. Kaasusäiliössä kaasun rakenneosaset ovat vuorovaikutuksessa männän kanssa. Vuorovaikutuksen voima tekee mekaanista työtä, mutta usein sanotaan, että laajeneva kaasu tekee työtä. Koska mäntä on herkkäliikkeinen, paine pysyy vakiona eli kyseessä on isobaarinen prosessi. Kun säiliössä vallitsee paine p, mäntään kohdistuu voima

$$F = pA,$$

jossa A on männän poikkipinta-ala. Kun mäntä liikkuu matkan Δx, kaasu laajenee tilavuuden

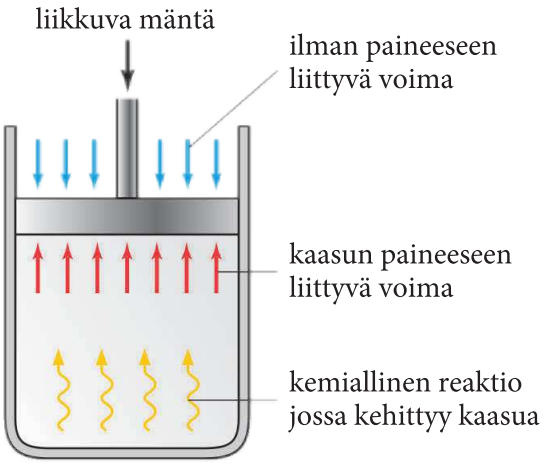
$$\Delta V = A \cdot \Delta x.$$

Samalla voiman tekemä työ isobaarisessa prosessissa on

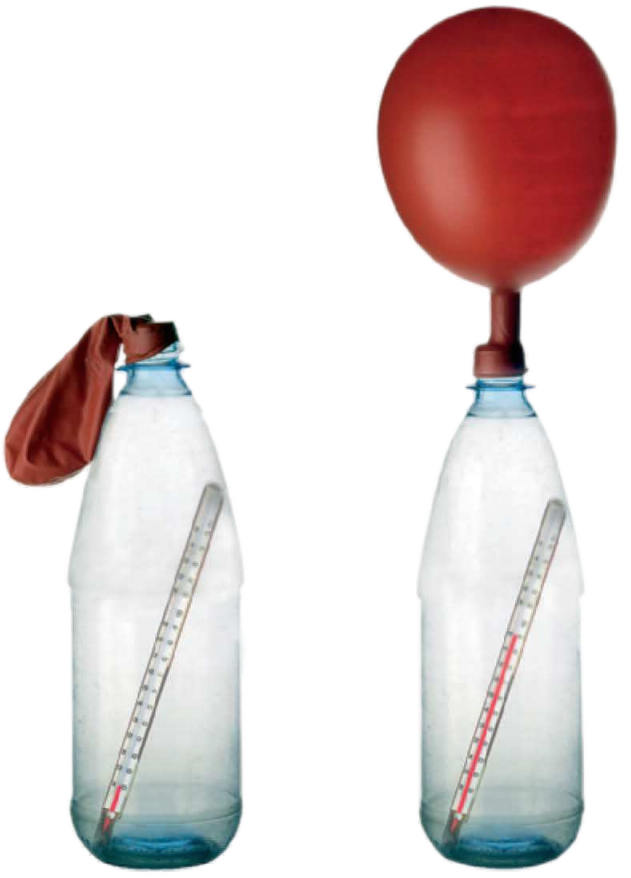
$$W = F\Delta x = pA \cdot \Delta x = p\Delta V.$$

Jos kaasuun siirtyy lisäksi lämpöä Q, kaasun sisäenergian muutos on

$$\Delta U = Q - p\Delta V.$$



Kemiallisessa reaktiossa muodostuvan kaasun rakenneosat ovat vuorovaikutuksessa männän kanssa. Vuorovaikutuksen voima tekee mekaanista työtä. Työ havaitaan männän työntymisenä ulospäin.



Pallo pullistuu, koska kaasu tekee työtä.

Kaasun tilanmuutoksia kuvataan graafisesti

Kaasun tilanmuutoksia on käytännöllistä tarkastella tilavuus–paine-koordinaatistossa. Isobaarisessa prosessissa paine on vakio. Isobaarista prosessia kuvaa V,p -koordinaatistossa vaakasuora viiva, jonka alkupiste on alkutilavuus V_a ja loppupiste lopputilavuus V_l. Tällöin työtä $W = p(V_l - V_a)$ on kuvaajan alla jäävä fysikaalinen pinta-ala. Jos tilavuus kasvaa prosessissa, kaasu tekee työtä ($W < 0$ J). Jos tilavuus pienenee, tehdään kaasuun työtä ($W > 0$ J).

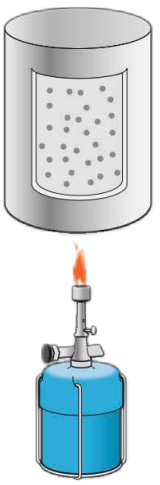
Isokoorisessa prosessissa tilavuus ei muutu. Koska tilavuus ei muutu, prosessissa ei ole työtä ($W = 0$ J). Jos paine kasvaa, kaasuun tuodaan lämpöä ($Q > 0$ J). Samalla kaasun sisäenergia kasvaa. Jos paine pienenee, kaasu luovuttaa lämpöä ja samalla sen sisäenergia pienenee ($Q < 0$ J).

Isotermisessä prosessissa lämpötila pysyy vakiona prosessin aikana. Koska kaasun tilavuus muuttuu, prosessiin liittyy myös työtä. Työtä kuvaa isotermikäyrän alle jäävä fysikaalinen pinta-ala. Jos kaasun tilavuus kasvaa prosessissa, kaasu tekee työtä ($W < 0$ J). Vastaavasti jos tilavuus pienenee, kaasuun tehdään työtä ($W > 0$ J).

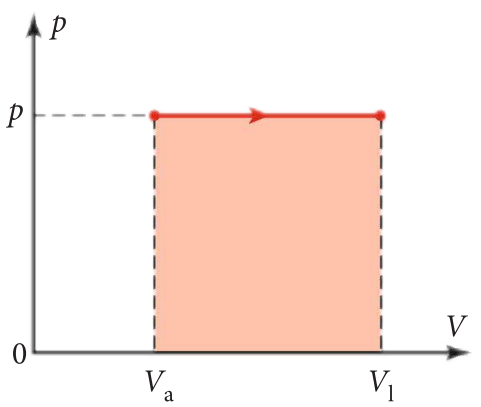
Yleisesti on voimassa, että tilavuus–paine-kuvaajan alle jäävä fysikaalinen pinta-ala kuvaa työtä kaikissa erilaisissa prosesseissa.

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan sisäenergian muutos on kaasuun tehdyn tai sen tekemän työn ja kaasuun tuodun tai siitä poistuneen lämpömäärän summa $\Delta U = W + Q$.

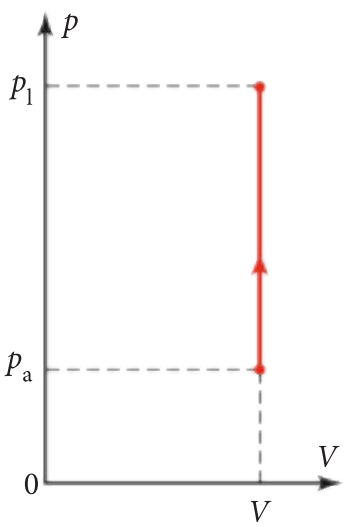
Isotermisessä prosessissa ideaalikaasun sisäenergia ei muutu eli $\Delta U = 0$, joten $W + Q = 0$. Kaasuun tuodaan tai siitä poistuu isotermisessä prosessissa työn verran lämpöä.



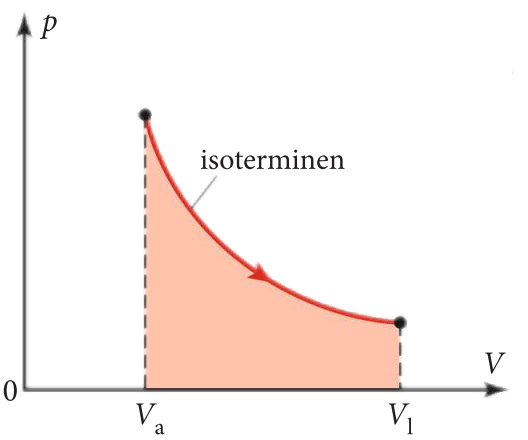
Isokoorisessa prosessissa paine kasvaa, jos kaasuun tuodaan lämpöä. Tilavuus ei muutu.



Työ isobaarisessa (p = vakio) prosessissa on kuvaajan alle jäävä fysikaalinen pinta-ala.



Isokoorisessa (V = vakio) prosessissa ei ole työtä.

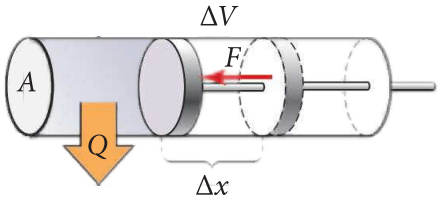


Isotermisessä (T = vakio) prosessissa työ on isotermikäyrän alle jäävä fysikaalinen pinta-ala.

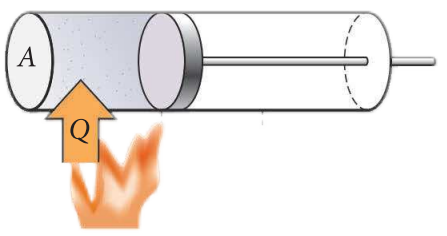
Auton polttomoottori on lämpövoimakone.

Lämpövoimakone
Lämpövoimakone on laite, joka ottaa kiertoprosessissa lämpöä, muuttaa osan lämmöstä työksi ja palauttaa lopun lämmön ympäristöön sekä palaa lopuksi alkutilaansa.

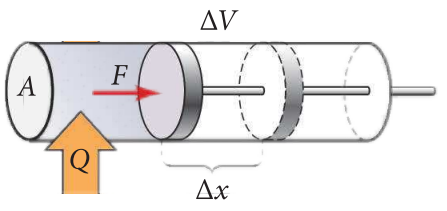
Kiertoprosessi



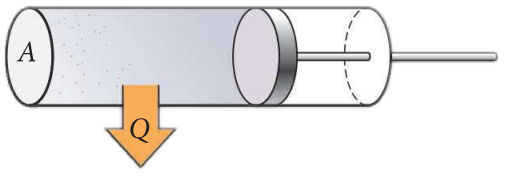
1. vaihe



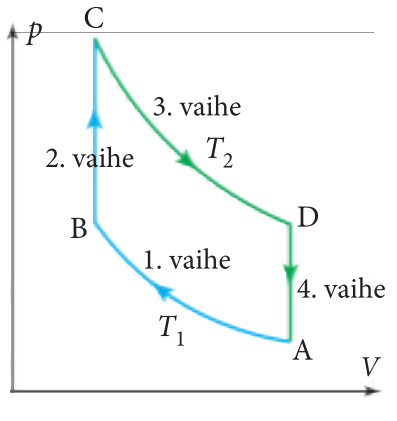
2. vaihe



3. vaihe



4. vaihe



Koneet muuntavat energiaa muodosta toiseen

Nykyaikainen yhteiskuntamme ei tule toimeen pelkällä ruumiillisella työllä, vaan tarvitaan myös koneiden tekemää työtä. Jos käytettävissä on esimerkiksi virtaavan veden mekaanista energiaa, sitä voidaan hyödyntää sellaisenaan. Koneet toimivat vain, jos ne saavat energiaa jostain. Ne muuttavat energiaa muodosta toiseen. Esimerkiksi polttomoottoreissa lämpö muutetaan mekaaniseksi työksi. Tällaista energian muutosta tekee **lämpövoimakone**.

Työ määritellään yleensä voiman tekemäksi työksi. Kappaleiden liikkeitä tarkasteltaessa on yleensä helppo tunnistaa kappaleeseen vaikuttava voima ja määrittää sen tekemä työ. Lämpöopissa ja varsinkin lämpövoimakoneiden yhteydessä on vaikea määrittää yksittäistä voimaa, joka tekee työtä. Siksi usein puhutaankin koneen tekemästä työstä. Näin tehdään myös tässä kirjassa, vaikka todellisuudessa työtä tekevät voimat, jotka ovat seurausta vuorovaikutuksista.

Lämpövoimakoneen yhteydessä **kiertoprosessilla** tarkoitetaan sitä, että systeemi palaa prosessin lopussa aina alkutilaan ja toistaa prosessin uudelleen ja uudelleen. Systeemi siis kiertää termodynaamisten tilojen välillä. Sisäenergian muutos on nolla kiertoprosessissa, kun systeemi palaa alkutilaansa.

Systeemi palaa alkutilaansa kiertoprosessin jälkeen

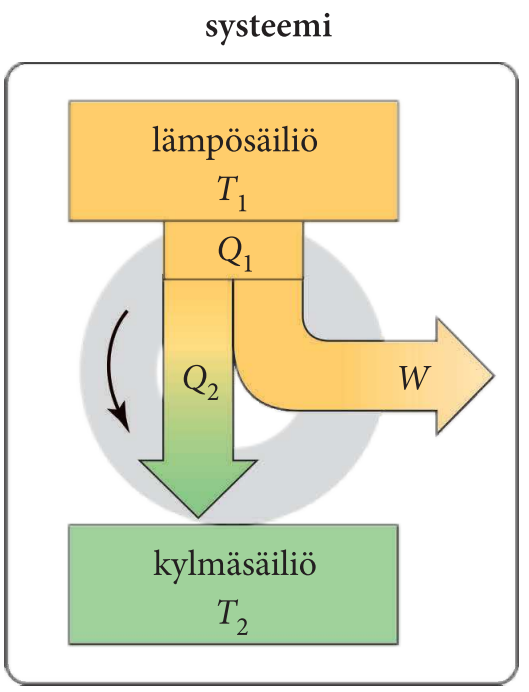
Tarkastellaan kiertoprosessia tarkemmin yksinkertaisen kokeen avulla. Kaasusäiliö on suljettu herkkäliikkeisellä männällä.

Kiertoprosessin **ensimmäisessä vaiheessa** (kuva) mäntää puristetaan ulkoisella voimalla F sisäänpäin. Kaasun paine kasvaa, kun tilavuus pienentyy. Systeemiin tehdään työtä. Kyseessä on isoterminen prosessi, sillä kaasun lämpötila pidetään vakiona. Prosessia kuvaa tilavuus–paine-koordinaatistossa käyrä AB. Ulkoisen voiman tekemää työtä vastaa isotermin AB rajoittama fysikaalinen pinta-ala. Prosessin aikana kaasusta poistuu lämpöä.

Toisessa vaiheessa (kuva) säiliön tilavuus pidetään vakiona. Samalla kaasuun tuodaan ulkopuolelta lämpöä. Kaasun paine ja sisäenergia kasvavat lämmöntuonnin seurauksena. Kyseessä on isokoorinen prosessi, ja sitä vastaa tilavuus–paine-koordinaatistossa suora BC.

Kiertoprosessin **kolmannessa vaiheessa** (kuva) kaasun tilavuus kasvaa lämpötilan pysyessä vakiona. Laajeneva kaasu tekee työtä. Kyseessä on isoterminen prosessi, ja sitä vastaa tilavuus–paine-koordinaatistossa oleva käyrä CD. Laajenevan kaasun tekemää työtä vastaa isotermin CD rajoittama fysikaalinen pinta-ala. Systeemiin siirtyy lämpöä.

Kiertoprosessin **neljännessä vaiheessa** (kuva) kaasu luovuttaa lämpöä ympäristöön tilavuuden pysyessä vakiona. Samalla kaasun paine pienenee ja sisäenergia vähenee. Prosessi on isokoorinen, ja sitä vastaa koordinaatistossa oleva suora DA. Systeemi on palannut alkutilaansa, ja sen sisäenergia on sama kuin kiertoprosessin alussa: $\Delta U = 0$.



Lämpövoimakoneen energiavirtakaavio. Lämpövoimakone toistaa kiertoprosessia. Jokaisella toistokerralla koneeseen siirtyy lämpösäiliöstä lämpömäärä Q_1. Kone luovuttaa osan Q_2 tästä energiasta kylmäsäiliöön, ja koneen tekemä työ on $W = Q_1 - Q_2$.

Lämpövoimakoneen hyötysuhde

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

jossa
W on koneen tekemä työ,
Q_1 on koneeseen siirtyvä lämpömäärä ja
Q_2 on koneesta poistuva lämpömäärä.

Lämpövoimakoneen maksimihyötysuhde eli Carnot-hyötysuhde

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

jossa
T_1 on lämpösäiliön lämpötila kelvineinä ja
T_2 on kylmäsäiliön lämpötila kelvineinä.

Lämpövoimakone käyttää lämmön työhön

Jokaisella lämpövoimakoneen toistokerralla koneeseen siirtyy lämpösäiliöstä lämpömäärä Q_1. Kone luovuttaa osan Q_2 tästä energiasta kylmäsäiliöön. Kone saa kierroksen aikana lämpömäärän

$Q = Q_1 - Q_2$.

Koska kone toistaa kiertoprosessia, se palaa jokaisen kierroksen jälkeen samaan termodynaamiseen tilaan. Koneen sisäenergia ei siis muutu, $\Delta U = 0$.

Ensimmäisen pääsäännön mukaan sisäenergian muutos
$\Delta U = Q + W$,
joten kiertoprosessin aikana
$Q + W = 0$ ja $Q = -W$.

Systeemin eli koneen tekemän työn itseisarvo on

$W = Q_1 - Q_2$.

Kone tekee työtä saamansa lämmön avulla.

Lämpövoimakone tarvitsee työn tekemiseen jonkin aineen. Polttomoottorissa se on polttoaineen ja ilman seos. Prosessin alussa polttoaineen ja ilman seoksen sisäenergia kasvaa, koska lämpösäiliöstä siirtyy aineeseen lämpömäärä Q_1. Tämän jälkeen kaasun sisäenergia pienenee, sillä kaasu luovuttaa lämpömäärän Q_2 ja tekee työn W.

Lämpövoimakoneen toiminnan edellytys on lämpötilaero. Jos kylmäsäiliötä ei jäähdytetä, lämpötilaero ja hyötysuhde pienenevät. Lämpöä on siis poistettava, sillä muuten lämpö- ja kylmäsäiliö olisivat prosessin jatkuessa samassa lämpötilassa. Koska vain osa nettolämmöstä muuttuu työksi, koneen **hyötysuhde** voidaan määritellä tehdyn työn (W) ja otetun lämmön (Q_1) suhteena. Lämpöopin teorian avulla voidaan johtaa suurin **teoreettinen hyötysuhde** eli **Carnot-hyötysuhde**.

Esimerkki 1 — Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö

Keitetty peruna, jonka lämpötila on 85 °C, jäähtyy huoneen lämpötilaan 21 °C.

a) Laske perunan sisäenergian muutos.

b) Kuinka paljon lämpöä siirtyy ympäristöön?

c) Kuinka paljon ympäristön sisäenergia muuttuu?

Perunan massa on 120 g ja ominaislämpökapasiteetti on $3{,}5\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$.

Ratkaisu

a) $t_1 = 85\ °\text{C}$, $t_2 = 21\ °\text{C}$, $c = 3{,}5\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$, $m = 0{,}120\ \text{kg}$, $t = 21\ °\text{C}$, $\Delta U = ?$

Perunan jäähtymisprosessiin ei liity työtä, $W = 0$, joten lämpöopin ensimmäisen pääsäännön mukaan $\Delta U = Q$. Lämpömäärä Q saadaan yhtälöstä $Q = cm\Delta t$. Perunan lämpötilamuutos on $\Delta t = 85\ °\text{C} - 21\ °\text{C} = 64\ °\text{C}$.

Sijoittamalla lukuarvot saadaan

$$Q = 3{,}5\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}} \cdot 0{,}120\ \text{kg} \cdot 64\ °\text{C}$$

$$= 26{,}88\ \text{kJ} \approx 27\ \text{kJ}.$$

Siten perunan sisäenergian muutos on 27 kJ.

b) Siirtyvä lämpömäärä on yhtä suuri kuin perunan sisäenergian muutos. Ympäristöön siirtyvä lämpömäärä on siten 27 kJ.

c) Kaikki lämpö siirtyy ympäristöön ja oletetaan, että mikään muu prosessi ei muuta sen sisäenergiaa. Silloin ympäristön sisäenergian muutos perunan jäähtyessä on 27 kJ.

Vastaus

a) Perunan sisäenergian muutos on 27 kJ.
b) Lämpöä siirtyy 27 kJ.
c) Ympäristön sisäenergian muutos on 27 kJ.

Esimerkki 2 — Laajenevan kaasun tekemä työ

Paine kaasusäiliössä on $1{,}2 \cdot 10^5\ \text{Pa}$. **Kaasu laajenee** $0{,}23\ \text{dm}^3$ **paineen pysyessä vakiona. Laske kaasun tekemä työ.**

Ratkaisu

$p = 1{,}2 \cdot 10^5\ \text{Pa}$, $\Delta V = 0{,}23\ \text{dm}^3$, $W = ?$

Sijoitetaan lukuarvot työn yhtälöön

$$W = p\Delta V,$$

jolloin saadaan

$$W = 1{,}2 \cdot 10^5\ \text{Pa} \cdot 0{,}23\ \text{dm}^3$$
$$= 1{,}2 \cdot 10^5\ \text{Pa} \cdot 0{,}23 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^3$$
$$= 27{,}6\ \text{J} \approx 28\ \text{J}.$$

Vastaus

Laajenemistyö on 28 J.

Esimerkki 3 — Sisäenergian muutos

Keittoa (massa 0,50 kg) vatkataan kolme minuuttia sähkövatkaimella, jonka teho on 250 W. Samanaikaisesti keitto on liedellä, jolloin siihen siirtyy lämpöä 80 000 J. Kuinka paljon keiton sisäenergia muuttuu?

Ratkaisu

$m = 0{,}50$ kg, $P = 250$ W, $t = 3{,}0$ min, $Q = 80{,}0$ kJ, $\Delta U = ?$

Sisäenergian muutos

$$\Delta U = Q + W.$$

Liedestä keittoon siirtynyt lämpömäärä $Q = 80\,000$ J. Tehty työ W saadaan tehosta, sillä

$$\begin{aligned} W &= Pt \\ &= 250\ \text{W} \cdot 3{,}0 \cdot 60\ \text{s} \\ &= 45\,000\ \text{J}. \end{aligned}$$

Oletetaan, että työ siirtyy kokonaisuudessaan keiton sisäenergiaksi.

Tällöin keiton sisäenergian muutos on

$$\begin{aligned} \Delta U &= 80\,000\ \text{J} + 45\,000\ \text{J} \\ &= 125\,000\ \text{J} \approx 130\ \text{kJ}. \end{aligned}$$

Vastaus

Sisäenergian muutos on 130 kJ.

Esimerkki 4 — Carnot-hyötysuhde

Hiilivoimalan generaattori käyttää energialähteenä höyryä, jonka lämpötila on noin 800 K. Turbiinista poistuvan höyryn lämpötila on noin 370 K. Laske voimalaitoksen teoreettinen maksimihyötysuhde.

Huomaa!

Käytännössä hyötysuhde on vain 35–40 %.

Ratkaisu

$T_1 = 800$ K, $T_2 = 370$ K, $\eta_{\max} = ?$

Maksimihyötysuhde saadaan Carnot-hyötysuhteen lausekkeesta

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

sijoittamalla lukuarvot $T_1 = 800$ K ja $T_2 = 370$ K.

Siten

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= 1 - \frac{T_2}{T_1} \\ &= 1 - \frac{370\ \text{K}}{800\ \text{K}} \\ &= 0{,}5375 \approx 0{,}54\,. \end{aligned}$$

Vastaus

Hiilivoimalan hyötysuhde on 54 %.

Esimerkki 5 — Moottorin hyötysuhde

Kuorma-auton moottoriin siirtyy jokaisella moottorikierroksella lämpömäärä 10,0 kJ. Se tuottaa työtä 2,0 kJ. Laske moottorin hyötysuhde.

Ratkaisu

$W = 2{,}0$ kJ, $Q_1 = 10{,}0$ kJ, $\eta = ?$

Kun sijoitetaan hyötysuhteen yhtälöön

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

lukuarvot, saadaan

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{2{,}0 \cdot 10^3\ \text{J}}{10{,}0 \cdot 10^3\ \text{J}}$$

$$= 0{,}20 = 20\ \%.$$

Vastaus

Moottorin hyötysuhde on 20 %.

Esimerkki 6 — Voimalan hyötysuhde

Hiilivoimala tuottaa sähköä 1,3 GW:n teholla. Polttamalla 1,0 kg hiiltä saadaan 6,2 MJ energiaa. Kuinka paljon hiiltä on poltettava sekunnissa, jos laitoksen hyötysuhde on 39 %?

Ratkaisu

$P = 1{,}3$ GW, $\eta = 0{,}39$, $m = ?$

Laitoksen tuottama energia on yhtä suuri kuin voimalan tekemä työ W, joka tehon avulla lausuttuna on

$$W = Pt.$$

Hiilivoimala tuottaa energiaa sekunnissa

$$W = Pt = 1{,}3 \cdot 10^9\ \text{W} \cdot 1\ \text{s}$$

$$= 1{,}3 \cdot 10^9\ \text{Ws} \approx 1{,}3 \cdot 10^9\ \text{J}.$$

Hiilivoimalan höytysuhde on

$$\eta = \frac{W}{Q_1},$$

josta saadaan voimalaan siirtyvä energia

$$Q_1 = \frac{W}{\eta},$$

sijoittamalla lukuarvot saadaan

$$Q_1 = \frac{1{,}3 \cdot 10^9\text{J}}{0{,}39} \approx 3{,}33 \cdot 10^9\ \text{J}.$$

Tarvittava hiilimäärä saadaan jakamalla lämpömäärä Q_1 kilogrammasta saatavalla lämpömäärällä. Siten hiiltä tarvitaan

$$m = \frac{3{,}33 \cdot 10^9\ \text{J}}{6{,}2 \cdot 10^6\ \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \approx 0{,}54 \cdot 10^3\ \text{kg} = 540\ \text{kg}.$$

Vastaus

Hiiltä tarvitaan sekunnissa 540 kg.

Tiivistelmä

- Sisäenergia on aineen rakenneosien liike- ja potentiaalienergiaa.
- Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö: systeemin sisäenergia muuttuu yhtä paljon kuin siihen siirtyy tai siitä poistuu energiaa työnä ja lämpönä.
- Laajeneva kaasu tekee työtä.
- Lämpövoimakone muuttaa osan ottamastaan lämmöstä työksi ja palauttaa lopun lämmön ympäristöön.
- Systeemi palaa kiertoprosessin jälkeen alkutilaansa. Tällöin systeemin sisäenergian muutos on nolla.
- Lämpövoimakoneen hyötysuhde on tehdyn työn ja otetun lämmön suhde.

Perustehtävät

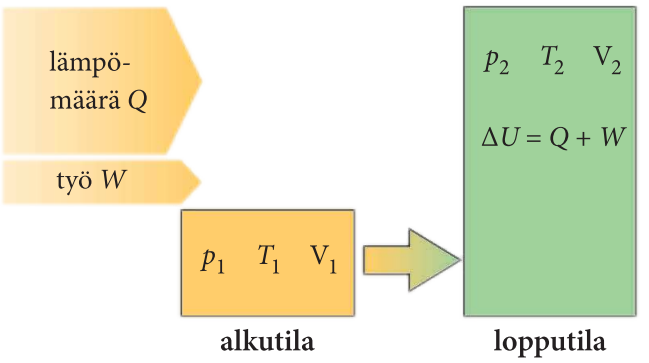
195. Miten systeemin sisäenergia voi muuttua?

196. **a)** Missä prosesseista kaasun sisäenergian muutos on suurin?

Prosessi	1	2	3	4
***Q* (J)**	10	5	8	1
***W* (J)**	6	1	3	2

b) Miten prosessi 2 toteutetaan käytännössä? Esim. 3

197. **a)** Kerro esimerkkejä luonnossa esiintyvästä tilanteesta, jota kuvaa oheinen energiakaavio.



b) Kuinka paljon muuttuu systeemin sisäenergia, jos siihen siirtyy lämpöä 23 kJ ja systeemi tekee työtä 15 kJ. Esim. 3

198. Topelius kuvaa ”Luonnonkirjassaan” vuodelta 1889 tulentekoa seuraavasti: ”Tuli syntyy kihnaamisesta. Metsä-ihmiset saavat tulta siten, että hierovat kahta kuivaa puupalasta toisiinsa.” Selitä tulenteon prosessi käyttämällä ensimmäistä pääsääntöä. Piirrä prosessia kuvaava energiakaavio.

199. Keittoa, jonka massa on 1,2 kg, vatkataan yleiskoneella. Yleiskoneen vatkaajan teho on 800 W ja vatkauksen kesto 2 minuuttia. Kuinka paljon keitto lämpenee, jos 40 % energiasta siirtyy siihen? Oletetaan, että keitolla on sama ominaislämpökapasiteetti kuin vedellä. Esim. 3

200. Auto, jonka massa on 1 350 kg, ajaa nopeudella 100 km/h. Kuinka paljon jarrulevyjen lämpötila nousee jarrutuksessa, jos 50 % kitkalämmöstä imeytyy niihin? Teräksisten jarrulevyjen yhteinen massa on 5,8 kg.

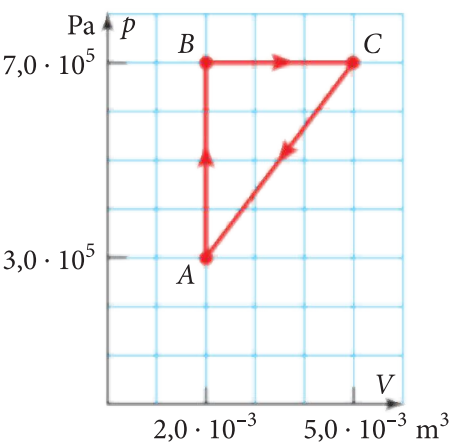
201. Kuinka suuren työn laajeneva kaasu tekee, kun mäntä liikkuu 12 cm normaali-ilmanpaineessa? Männän poikkipinta-ala on 90 cm^2. Esim. 2

202. Laita lattialle vasara ja sen päälle paperia. Iske toisella vasaralla paperiin. Mitä tapahtuu? Miksi?

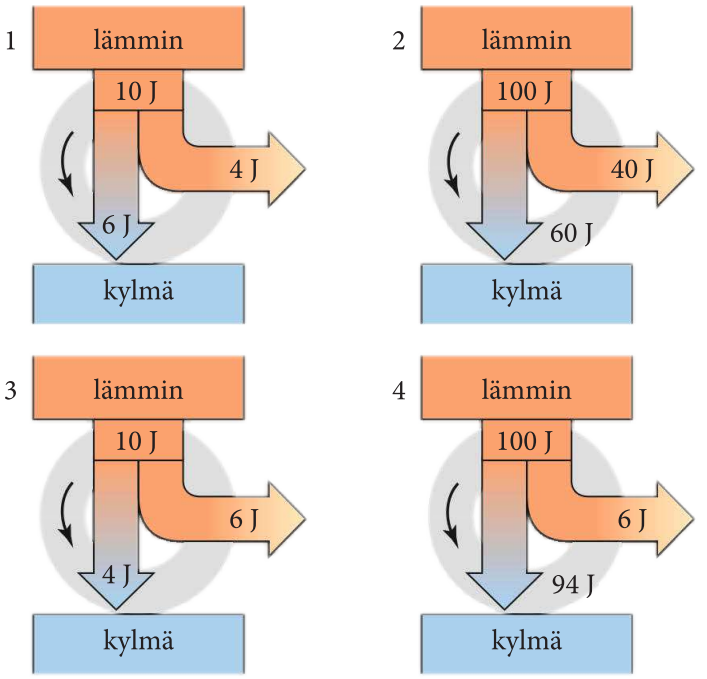
Soveltavat tehtävät

203. Kaasun paine ja tilavuus muuttuvat reitin ABCA mukaan.
Laske kussakin prosessissa tehty työ. Käytä kuvissa annettuja tietoja.

a) AB
b) BC
c) CA



204. Laita lämpövoimakoneiden hyötysuhteet suuruusjärjestykseen suurimmasta pienimpään.



205. Lämpövoimakone toimii lämpötilavälillä 330 K…850 K. Kuinka suuri koneen maksimaalinen hyötysuhde on?

206. Lämpövoimakoneen Carnot-hyötysuhde on 40 %. Kylmäsäiliön lämpötila on 7,00 °C. Mikä lämpösäiliön lämpötila on?

207. Lämpövoimakoneen kylmäsäiliön lämpötila on 47 °C, ja sen hyötysuhde on 20 %. Kuinka paljon lämpösäiliön lämpötilaa pitää nostaa, jotta hyötysuhde nousisi 25 %:iin?

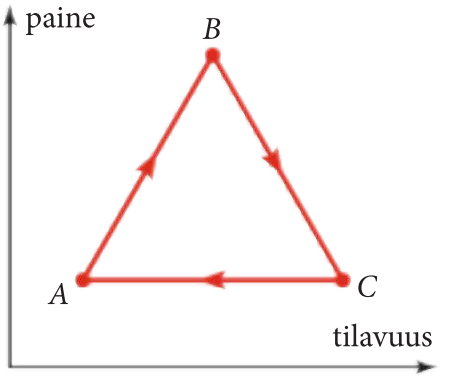
208. Lämpövoimakone ottaa joka kierroksella 100 kJ lämpöä lämpösäiliöstä ja luovuttaa 80 kJ kylmäsäiliöön.

a) Laske koneen hyötysuhde.

b) Koneen hyötysuhde on 50 % maksimaalisesta hyötysuhteesta. Mikä kylmäsäiliön lämpötila on, kun lämpösäiliön lämpötila on 850 K?

209. Patenttivirastoon lähetettiin kone rekisteröintiä varten. Keksijän mukaan se ottaa 100 kJ jokaisella työkierroksella lämpösäiliöstä (127 °C), suorittaa 60 kJ:n työn ja luovuttaa −72 °C:n lämpötilassa lämpömäärän 40 kJ. Hyväksyttiinkö patenttihakemus?

210. Kaasu on suljettu herkkäliikkeisellä männällä sylinteriin. Kuva esittää kolmea prosessia AB, BC ja CA.

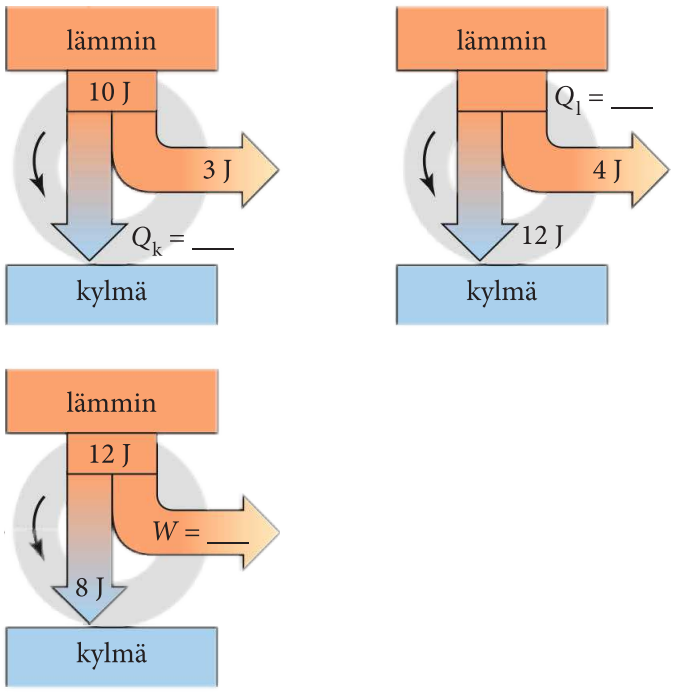


Missä prosesseista AB, BC, CA työ W on positiivinen, missä nolla ja missä negatiivinen?

	AB	BC	CA
$W < 0$ J			
$W = 0$ J			
$W > 0$ J			

211. Systeemiin siirtyy 1500 J:n lämpömäärä, ja systeemin sisäenergia kasvaa 4500 J ja tilavuus pienenee 0,010 m^3. Kuinka suuri prosessin aikana vakiona pysyvä paine on?

212. Merkitse puuttuvat suureiden arvot jokaiselle lämpövoimakoneelle.



14 Lämpöopin toinen pääsääntö

Ennen sekoitusta väriaine on pipetissä ja vesi astiassa. Lopputilanteessa väriaine on sekoittunut tasaisesti veteen. Veden ja väriaineen muodostama systeemi on lopputilanteessa tasapainossa.

Lämpöopin toinen pääsääntö prosessin suunnan avulla ilmaistuna
Kaikki termodynaamiset prosessit suuntautuvat kohti tasapainoa.

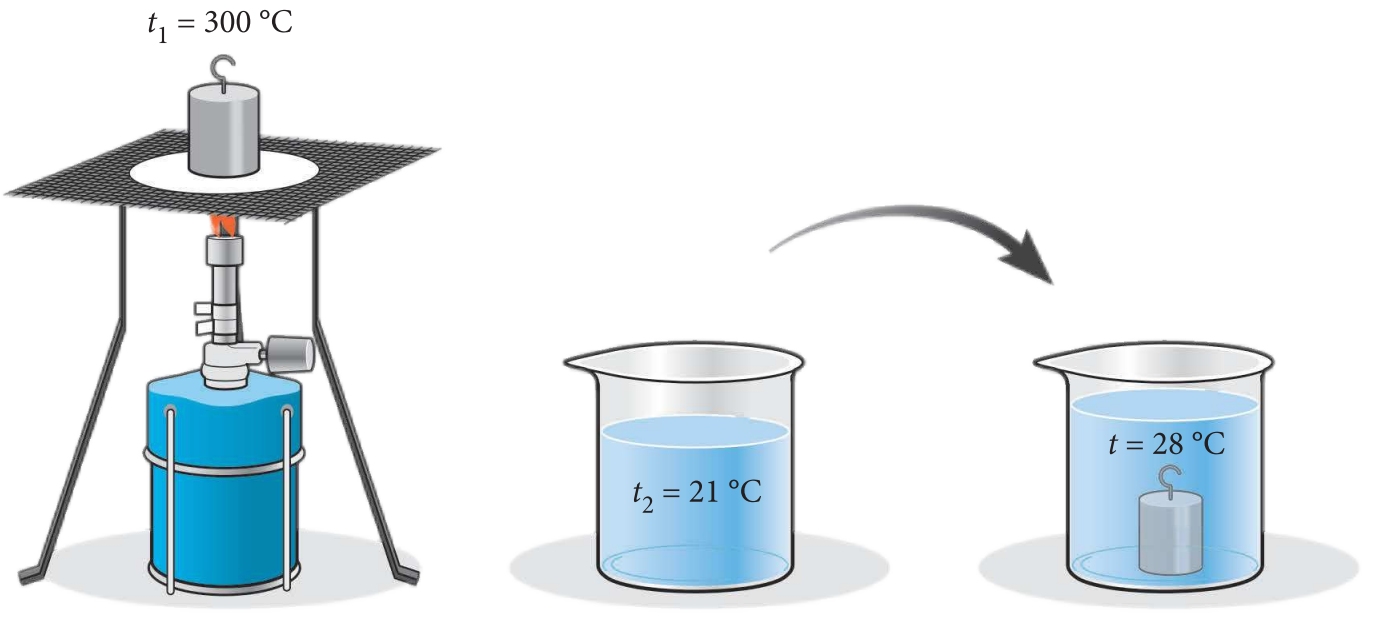
Termodynaamiset systeemit suuntautuvat tasapainoon

Useimmat havaittavat prosessit kulkevat tiettyyn suuntaan. Esimerkiksi veteen pisarana lisätty väriaine sekoittuu ajan mittaan itsestään veteen. Väriainemolekyylit ja vesimolekyylit ovat lopulta jakautuneet tasaisesti, eikä muutoksia enää tapahdu. Kun kuuma rautapunnus pannaan kylmään veteen, punnuksesta siirtyy lämpöä veteen. Lämpöä siirtyy, kunnes lämpötilat ovat tasoittuneet.

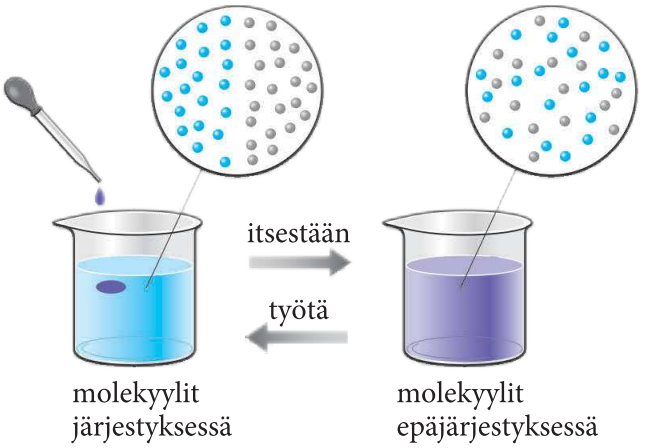
Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö on energian säilymisen laki. Se sallii väriaineen erottumisen takaisin väriainepisaraksi. Väriaineen erottumista itsestään takaisin pisaraksi ei kuitenkaan ole koskaan havaittu tapahtuvan. Myös lämpötilaerojen uudelleen syntyminen olisi lämpöopin ensimmäisen pääsäännön mukaan mahdollista, mutta myöskään näin ei ole koskaan havaittu itsestään tapahtuvan.

Systeemin sanotaan olevan termodynaamisessa **tasapainossa**, kun siinä ei tapahdu näkyviä muutoksia. Väriaineen ja veden muodostama systeemi on tasapainossa, kun väriaine on levinnyt tasaisesti veteen. Samoin rautapunnuksen ja veden muodostama systeemi on tasapainossa, kun lämpötilat ovat tasoittuneet. Tasapainossa systeemin epäjärjestys on suurin.

Lämpöopin toisen pääsäännön mukaan kaikki termodynaamiset prosessit suuntautuvat kohti tasapainoa eli tilannetta, jossa systeemissä ei tapahdu muutoksia. Siten myös ympäristössä tapahtuvissa prosesseissa lämpötilat tasoittuvat ja aineet sekoittuvat tasaisesti.



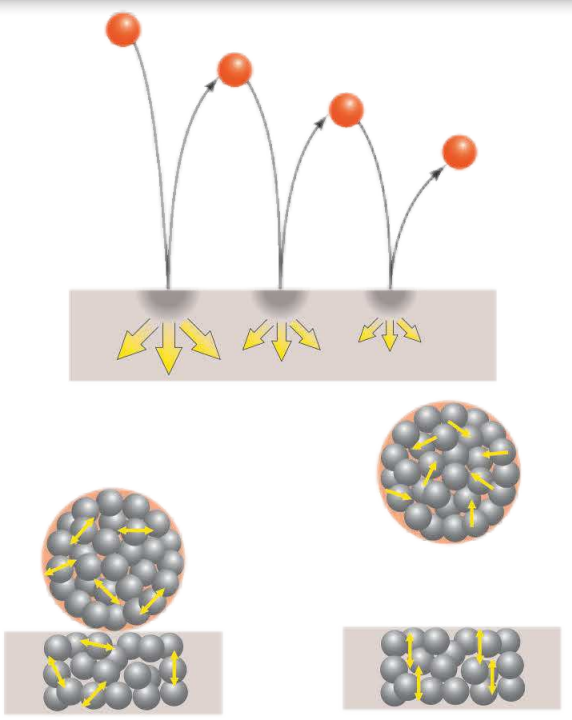
Punnuksen ja veden muodostama systeemi on tasapainossa, kun lämpötilaero on tasoittunut.



Väriaine sekoittuu itsestään veteen, jolloin entropia kasvaa. Tekemällä työtä esimerkiksi sopivalla kemiallisella prosessilla väriaine saadaan takaisin vedestä ja systeemin entropia pienenee.

Lämpöopin toinen pääsääntö entropian avulla ilmaistuna
Entropia kasvaa eristetyissä termodynaamisissa systeemeissä. Entropia on suurin tasapainotilassa.

Energian huononeminen
Kokonaisenergian määrä ei muutu, mutta itsestään tapahtuvan prosessin jälkeen energia ei ole niin hyödynnettävissä kuin ennen prosessia.



Pallo on aluksi paikoillaan lattialla. Sekä pallon että lattian rakenneosien lämpöliike on satunnaista. Jotta pallo pomppaisi ilman ulkoista voimaa ilmaan, lattian satunnaisen lämpöliikkeen tulisi muuttua hetkellisesti samansuuntaiseksi. Näin ei ole koskaan havaittu käyvän.

Entropia ilmoittaa ilmiöiden suunnan

Lämpöopin toisen pääsäännön kuvaama ilmiöiden suunta voidaan ilmaista myös **entropia**-suureen avulla. Entropia liittyy aineen mikroskooppisten rakenneosien järjestykseen. Tasapainotilassa systeemin entropia on suurin.

Väriaineen ja veden sekoittumisessa tasapainotila saavutetaan, kun väriaine on sekoittunut tasaisesti veteen. Tällöin veden ja väriaineen muodostaman systeemin entropia saa suurimman arvonsa. Tätä makroskooppisesti havaittavaa makrotilaa vastaa suurin mahdollinen määrä erilaisia rakenneosien keskinäisiä järjestyksiä ja nopeuksia, jotka tuottavat samat tilanmuuttujien arvot.

Jos entropiaa halutaan pitää yllä tai pienentää, tarvitaan ulkoista energiaa. Esimerkiksi väriainemolekyylit saa tislaamalla erilleen vesimolekyyleistä. Tislaaminen vaati runsaasti ulkoa systeemiin tuotavaa energiaa.

Solussa eri molekyyleillä on tarkasti määrätyt paikat, joten solu on erittäin järjestynyt systeemi. Sen entropia on siten pieni. Solujen syntyminen ei kuitenkaan ole lämpöopin toisen pääsäännön vastaista, sillä kun huomioidaan myös ympäristö, havaitaan solun ja sen ulkopuolisen maailman kokonaisentropian kasvavan.

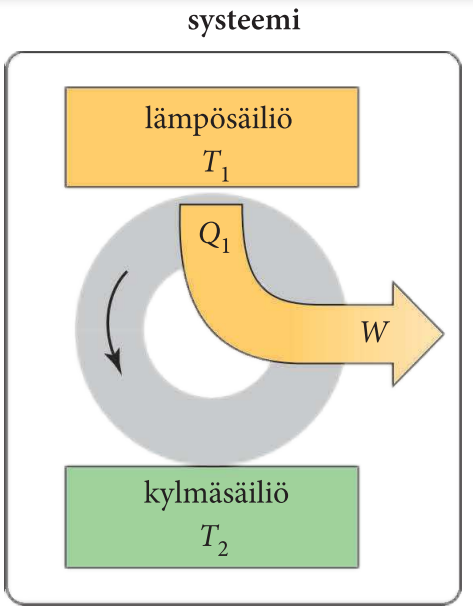
Energia huononee, kun se muuntuu lämpöenergiaksi

Luonnon prosesseissa energian sanotaan **huononevan**. Tällä tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi mekaaninen energia muuntuu lämpöenergiaksi. Energian huononemista voidaan kuvata pallon pomppimisen avulla. Osuttuaan lattiaan pallo ei pomppaa enää alkuperäiseen korkeuteen, sillä osa pallon mekaanisesta energiasta on muuntunut lattian ja pallon sisäenergiaksi. Sisäenergian muutos liittyy lattian rakenneosien lämpöliikkeen lisääntymiseen. Tämän prosessin spontaani eli itsestään tapahtuva suunta on kohti tilannetta, jossa pallo on paikallaan lattialla ja kaikki sen mekaaninen energia on muuntunut lattian ja pallon rakenneosien satunnaiseksi lämpöliikkeen energiaksi eli lämpöenergiaksi.

Milloinkaan ei ole havaittu tilannetta, jossa lattialla paikallaan oleva pallo olisi alkanut itsestään pomppia. Jotta pallo alkaisi pomppia, tulisi lattian rakenneosien satunnaisliikkeen olla hetkellisesti samansuuntaista. Voidaan ajatella, että rakenneosien liikkeillä on lähes ääretön määrä erilaisia liikesuuntia. Näistä vain yksi tapaus olisi edellä kuvattu liike, jossa rakenneosien liike on samansuuntaista.

Entropia kasvaa, koska tasapainotilan todennäköisyys on suurin. Luonnossa prosessit pyrkivät kohti suurempaa entropiaa. Entropian kasvamiseen liittyy myös energian huononeminen.

Lämpöopin toinen pääsääntö lämpövoimakoneen avulla ilmaistuna
Sellaista lämpövoimakonetta, joka muuttaisi kaiken ottamansa lämmön työksi, ei voida rakentaa.



Lämpöopin toinen pääsääntö kieltää sellaisen lämpövoimakoneen olemassaolon, joka ottaisi lämpöä ja muuttaisi sen kokonaan työksi. Ensimmäinen pääsääntö ei tätä vielä kiellä, sillä sen mukaan energia säilyy prosessissa.

Kaikkea lämpöä ei voi muuttaa työksi

Lämpöopin ensimmäinen pääsääntö kuvaa energian säilymistä. Sen mukaan kone ei voi tuottaa enemmän energiaa kuin mitä se käyttää. Tällainen kone olisi niin sanottu **ensimmäisen lajin ikiliikkuja**.

Lämpövoimakonetta, joka muuttaisi kaiken lämmön työksi, kutsutaan **toisen lajin ikiliikkujaksi**. Se ei riko lämpöopin ensimmäistä pääsääntöä, mutta on vastoin lämpöopin toista pääsääntöä. Yksinkertainen perustelu tälle tulokselle on se, että hyötysuhde ei koskaan voi olla 1, joten yhtälössä

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

kylmäsäiliöön luovutettava lämpömäärä Q_2 ei voi olla nolla.

Lämpövoimakoneen maksimihyötysuhde on

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Jos lämpövoimakoneen kylmäsäiliön lämpötila olisi $T_2 = 0$ K, hyötysuhde olisi silloin 1. Tämä ei ole mahdollista toisen pääsäännön mukaan. Klassisen fysiikan mukaan absoluuttisessa nollapisteessä atomien liike pysähtyy kokonaan. Absoluuttista nollapistettä ei voi saavuttaa, mutta sitä voidaan lähestyä äärettömän lähelle. Tätä kutsutaan usein **lämpöopin kolmanneksi pääsäännöksi**.

Lämpöopin kolmas pääsääntö
Absoluuttista nollapistettä ei voi saavuttaa.

Esimerkki 1 — Entropia kasvaa

Veteen lisätään mehutiivistettä. Kuvaile prosessia lämpöopin pääsääntöjen avulla.

Ratkaisu

Ennen mehutiivisteen sekoittamista veteen veden ja mehutiivisteen muodostamalla systeemillä on suuri järjestys. Tiivisteen rakenneosat ovat mehupullossa ja veden mehukannussa. Tässä tilanteessa entropian arvo on pieni.

Lämpöopin toisen pääsäännön mukaan kaikki systeemit suuntautuvat kohti tasapainoa. Kun mehutiiviste kaadetaan veteen, veden ja mehutiivisteen muodostama systeemi suuntautuu kohti tasapainoa. Voidaan ajatella, että mehun ja veden rakenneosien liikkeillä on lähes ääretön määrä erilaisia liikesuuntia. Näin rakenneosat sekoittuvat keskenään. Entropia kasvaa, koska tasapainotilan todennäköisyys on suurin. Tasapainotilassa mehutiiviste on tasaisesti jakautunut veteen. Tätä makroskooppisesti havaittavaa makrotilaa vastaa suurin mahdollinen määrä erilaisia rakenneosien keskinäisiä järjestyksiä ja nopeuksia.

Tiivistelmä

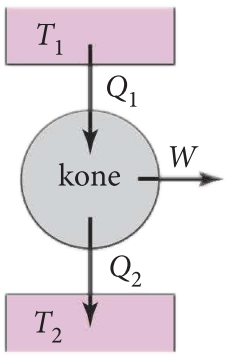
- Lämpöopin toinen pääsääntö: kaikki termodynaamiset prosessit suuntautuvat kohti tasapainoa.
- Systeemin entropia on suurin tasapainotilassa.
- Energia huononee, kun mekaaninen energia muuntuu lämpöenergiaksi.
- Lämpövoimakonetta, joka muuttaa kaiken ottamansa lämmön työksi ei voida rakentaa.
- Lämpöopin kolmas pääsääntö: absoluuttista nollapistettä ei voi saavuttaa.

Perustehtävät

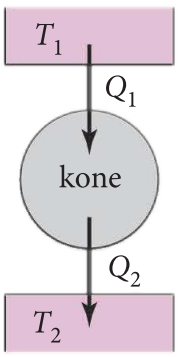
213. Selitä lämpöopin toisen pääsäännön sisältö.

214. Jotkin oheisista kuvioista esittävät termodynaamisten koneiden energiavirtakaavioita. Q_1 ja Q_2 ovat koneen ja lämpösäiliöiden välillä siirtyviä lämpömääriä. Lämpösäiliöiden lämpötilat ovat T_1 ja T_2 ($T_1 > T_2$).

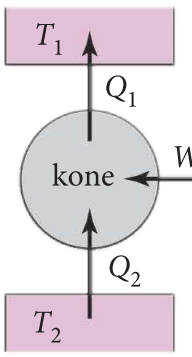
a)



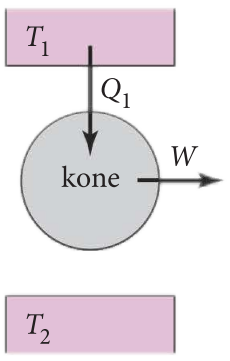
b)



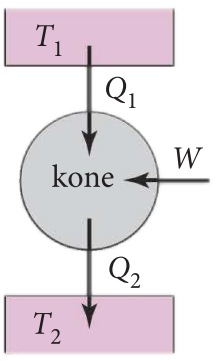
c)



d)



e)



Perustele,

a) mikä kaavioista on toisen pääsäännön vastainen

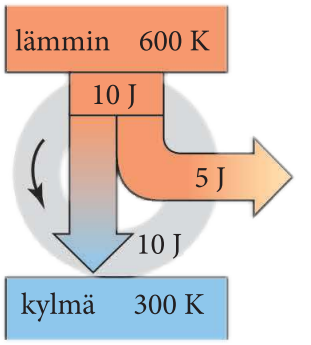
b) mikä kaavioista voi esittää kivihiilivoimalaa tai ydinvoimalaa. (Yo syksy 2003, teht. 16)

215. Kerro kolme esimerkkiä luonnossa esiintyvistä tasapainoon pyrkivistä prosesseista.

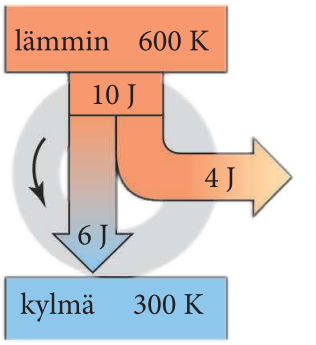
216. Teehen lisätään sokeripaloja. Kuvaile prosessia lämpöopin pääsääntöjen avulla.

217. Ovatko alla olevat kaaviot todellisten lämpövoimakoneiden mukaisia? Jos eivät ole, niin miksi?

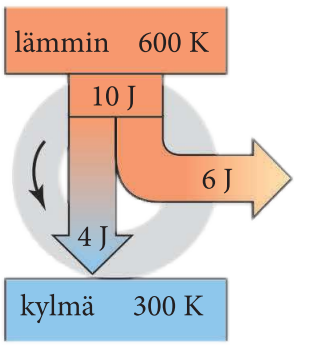
a)



b)

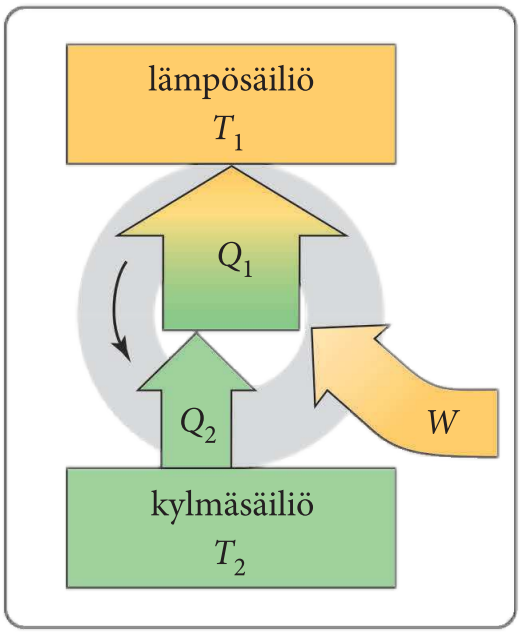


c)



218. Kun maapallon energiavaroja hyödynnetään laajamittaisesti, lämpöenergia on useimmissa prosesseissa oleellinen osa energianmuutosketjua. Miksi tämä on ongelmallista energiavarojen kulumisen kannalta lämpöopin II pääsäännön valossa? (Yo kevät 2006, teht. 5)

15 Lämpöpumppu siirtää lämpöä



Jäähdytyskoneen energiavirtakaavio. Ulkoisen työn *W* avulla jäähdytettävästä systeemistä poistetaan lämpömäärä Q_2. Energian säilymisperiaatteen mukaan koneesta poistuu lämpömäärä $Q_1 = Q_2 + W$.

Jäähdytyskoneen suorituskyky

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$, jossa

W on koneen tekemä työ,
Q_1 on koneesta lämpösäiliöön siirtyvä lämpömäärä ja
Q_2 on koneeseen kylmäsäiliöstä siirtyvä lämpömäärä.
Suorituskyvyn maksimiarvo

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$, jossa

T_2 on kylmäsäiliön lämpötila ja
T_1 on lämpösäiliön lämpötila.

Jäähdytyskone ottaa lämpöä kylmäsäiliöstä

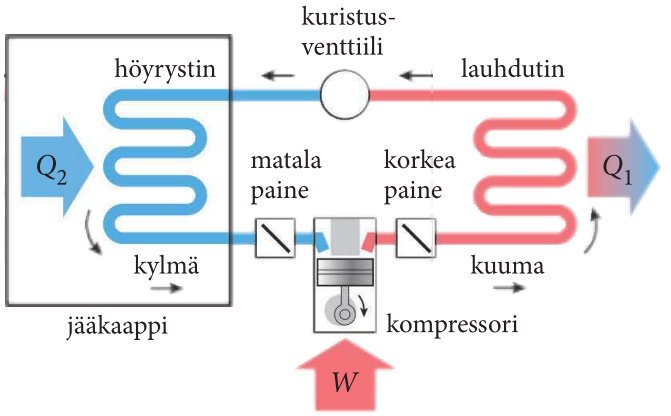
Lämpöä voi siirtyä itsestään vain kuumemmasta systeemistä kylmempään. Mikäli kylmemmästä systeemistä halutaan siirtää lämpöä kuumempaan, tarvitaan ulkopuolista energiaa, työtä.

Jäähdytyskone toimii päinvastoin kuin lämpövoimakone. Lämpövoimakone ottaa lämpösäiliöstä lämpöä, tekee sen avulla työtä ja luovuttaa lopun lämmöstä kylmäsäiliöön. Jäähdytyskone käyttää hyväkseen työtä eli ulkopuolista energiaa. Työn W avulla jäähdytyskone siirtää kylmäsäiliöstä lämpömäärän Q_2. Koneesta poistuu lämpösäiliöön lämpömäärä $Q_1 = Q_2 + W$. Prosessi jäähdyttää kylmäsäiliötä ja lämmittää lämpösäiliötä. Jäähdytyskoneen tehokkuutta kuvaa suorituskyky, joka on kylmäsäiliöstä siirtyvän lämpömäärän suhde käytettyyn mekaaniseen työhön.

Jäähdytyskoneen suorituskykyä kutsutaan usein myös koneen kylmäkertoimeksi.

Jos jäähdytyskoneen suorituskyky on 3, se tarkoittaa, että kylmäsäiliöstä poistetaan käytettyyn energiaan verrattuna kolminkertainen määrä energiaa. Jos jäähdytyskone käyttäisi 100 J mekaanista energiaa, se siirtäisi kylmäsäiliöstä 300 J. Suorituskyvylle voidaan johtaa myös teoreettinen maksimiarvo ε_{max}.

Lämpö postuu ulkoilmaan jääkaapin takana olevassa lauhduttimessa.



Höyrystyminen sitoo lämpömäärän Q_2 jääkaapin sisältä, jolloin jääkaappi jäähtyy. Tiivistyessään höyry luovuttaa lämpömäärän Q_1 lauhduttimessa jääkaapin ulkopuolelle.

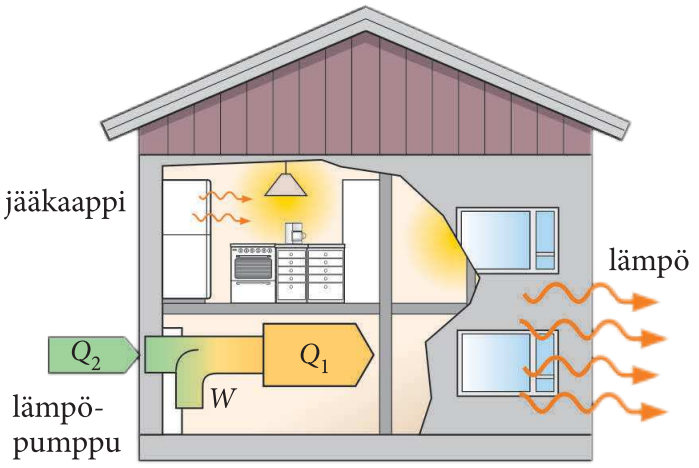
Jääkaappi on jäähdytyskone

Jääkaappi on **jäähdytyskone**. Sen toiminta perustuu jäähdytysputkistossa kiertävän nesteen, kylmäaineen, olomuodonmuutoksiin. Nykyään kylmäaineena käytetään yleisimmin isobutaania, joka on hiilivety.

Kun neste höyrystyy jääkaapin sisällä olevassa höyrystimessä, se sitoo jääkaapista lämpömäärän Q_2. Tällöin kaapin sisäenergia pienenee ja sen lämpötila laskee. Jotta jäähdytysneste kiertäisi putkistossa oikealla tavalla, höyryä täytyy pumpata. Kompressori puristaa höyryn korkeaan paineeseen. Höyry lämpenee tällöin huoneilmaa lämpimämmäksi. Kompressori tekee siten työn W. Kompressorin työhön tarvitsema energia otetaan useimmiten sähköverkosta.

Kuuma höyry tiivistyy jääkaapin takaseinässä olevassa lauhduttimessa. Tällöin kylmäaine luovuttaa energian Q_1 jääkaapin takana olevaan ilmaan. Lauhduttimen jälkeen neste virtaa kuristusventtiilin läpi uudelleen höyrystimeen. Venttiilin vaikutuksesta paine alenee ja jäähdytysneste palautuu höyrystimessä vallitsevaan tilaan, höyrystyväksi nesteeksi. Tämän jälkeen prosessi toistuu.

Energiaperiaatteen mukaan koneesta poistuu lämpömäärä $Q_1 = W + Q_2$.



Talvella huoneistosta poistuu energiaa ulkoilmaan. Jotta huoneistossa pysyisi sama lämpötila, huoneistoon pitää siirtää energiaa. Energiaa tulee kodinkoneista, esimerkiksi jääkaapista. Lämpöpumppu ottaa energiaa ilmasta, vedestä tai maasta ja siirtää sitä ulkoisen työn avulla huoneistoon.

Lämpöpumppua käytetään talojen lämmitykseen

Lämpöpumppu toimii kuten jäähdytyskone, mutta sen tarkoituksena on lämmittää lämpösäiliötä kylmäsäiliöstä otetun lämmön ja ulkoisen työn avulla.

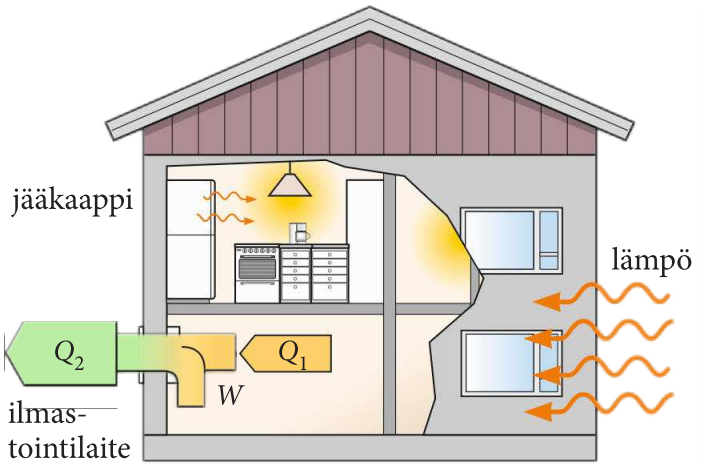
Lämpöpumppua käytetään muun muassa omakotitalojen lämmitykseen. Lämpöpumpun tehokkuutta kuvaa **suorituskyky**, joka on lämpösäiliöön siirrettävän lämpömäärän suhde käytettyyn mekaaniseen työhön eli Q_1/W.

Maalämpöpumput siirtävät lämpöä maaperästä tai vesistöstä asuntoihin. Maaperän lämpöenergia tai porakaivossa oleva vesi lämmittää lämpöpumpun putkessa kiertävän nesteen, joka on veden ja alkoholin seos. Lämpöpumppu siirtää lämmön nesteestä talteen. Käytännössä kyse on kylmäaineen höyrystymisestä putkistossa ja nesteytymisestä lämmönvaihtimissa. Lämpöä siirtyy maaperästä asuntoon. Sähköä tarvitaan vain kompressorin ja kiertovesipumppujen pyörittämiseen, eli energiaa kuluu vain lämmön siirtoon maaperästä rakennukseen. Ilmaisenergian osuus on noin 70 %.

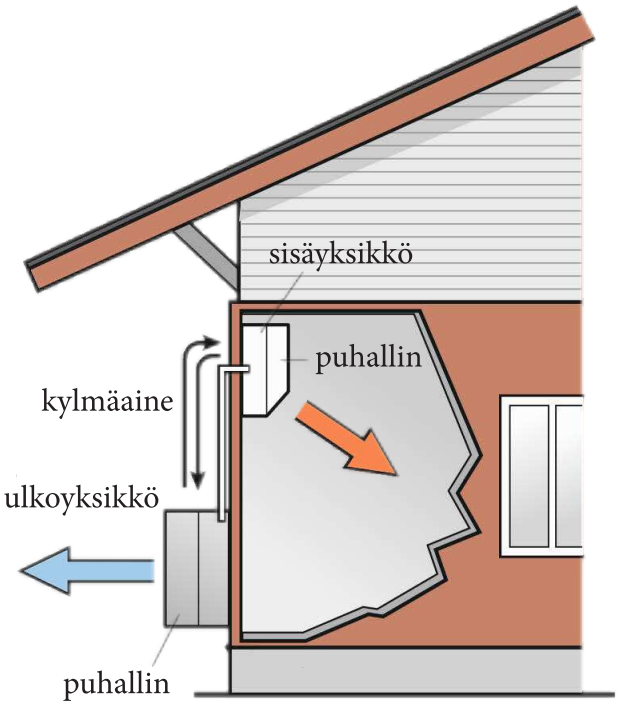
Lämpöpumpun suorituskyky

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2},$$

jossa
W on lämpöpumpun tekemä työ
Q_1 on lämpöpumpusta siirtyvä lämpömäärä ja
Q_2 on lämpöpumppuun siirtyvä lämpömäärä.



Huoneistoon siirtyy lämpöä kesällä esimerkiksi auringonsäteilystä ja jääkaapin lauhduttimesta. Ilmalämpöpumppu poistaa lämpömäärän Q_2 asunnosta. Lämmön poistamiseen kone tarvitsee energian W. Energiaperiaatteen mukaan koneesta poistuu lämpömäärä $Q_1 = W + Q_2$.



Ilmalämpöpumpussa on puhallin sekä sisä- että ulkoyksikössä. Puhallin kierrättää ilmaa kennoilla ja lämmön siirtyminen kennossa tehostuu.

Ilmalämpöpumppu lämmittää ja jäähdyttää asuntoja

Ilmalämpöpumput siirtävät lämpöä ulkoilmasta asuntoihin. Ilmalämpöpumppujen suorituskyky on jopa yli viiden, kun ulkolämpötila on +7 °C. Tämä tarkoittaa, että yhdellä kilowattitunnilla sähköenergiaa saadaan siirrettyä ulkoilmasta sisätiloihin viisi kilowattituntia lämpöä. Vielä –20 °C:n lämpötilassa suorituskerroin on noin kaksi.

Lämmityskäytössä ilmalämpöpumpun putkistossa kiertävä kylmäaine höyrystyy ulkoyksikön kennossa ja sitoo lämpöenergiaa kennossa kiertävästä ilmasta. Ilmankiertoa tehostetaan ulkoyksikön puhaltimella, joka siirtää ilmaa kennon läpi. Kennon lämmönsiirtokyky tehostuu, kun ilma virtaa sen läpi.

Ulkoista työtä tarvitaan kylmäaineen kierrättämiseen ja kompressorin toimintaan. Kompressori puristaa höyryä pienempään tilavuuteen ja työntää höyryn sisäyksikön kennoon, jossa se tiivistyy nesteeksi paineen vaikutuksesta. Olomuodon muutoksessa vapautuu lämpöä ja kenno lämpenee. Sisäyksikön puhallin siirtää kennon läpi ilmaa, ja lämpö siirtyy huoneilmaan kennossa lämmenneen ilman mukana. Sisäyksikön jälkeen neste jatkaa paineen vaikutuksesta ulkoyksikön kennoon. Ennen ulkokennoa on putkessa kuristimeksi sanottu pieni kavennus. Sen tehtävä on hidastaa nesteen kulkua ja säilyttää kompressorin aikaansaama paine.

Ilmalämpöpumppua voidaan käyttää kesällä asuntojen jäähdyttämiseen. Jäähdytyskäytössä kylmäaineen virtaus käännetään vastakkaiseksi. Sisäyksikön kennossa höyrystyvä kylmäaine sitoo lämpöenergiaa puhaltimen kierrättämästä huoneilmasta. Tällöin huoneilma viilenee. Huoneilman viilentäminen kuluttaa runsaasti energiaa, joten viilennystä ei kannata pitää päällä kuin tarvittaessa.

Ilmalämpöpumpulla voidaan sekä lämmittää että jäähdyttää asuntoja.

Esimerkki 1 — Pakastimen suorituskyky

Pakastimen lämpötila on –23 °C ja huoneen +20,0 °C.

a) Mikä on pakastimen suurin mahdollinen suorituskyky?

b) Kuinka suuri koneen jäähdytysteho on, jos koneen sähköenergiasta ottama mekaaninen teho on 95 W?

Ratkaisu

a) $t_2 = -23\ °C$, $t_1 = 20{,}0\ °C$, $\varepsilon_{max} = ?$

Pakastin toimii samalla periaatteella kuin jäähdytyskone, joten suurin mahdollinen teho saadaan lasketuksi yhtälöllä

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Yhtälössä lämpötilat ovat kelvineinä, joten muutetaan lämpötilat kelvineiksi:

$T_2 = (-23 + 273)\ \mathrm{K} = 250\ \mathrm{K}$
$T_1 = (20 + 273)\ \mathrm{K} = 293\ \mathrm{K}.$

Tällöin

$$\varepsilon_{max} = \frac{250\ \mathrm{K}}{293\ \mathrm{K} - 250\ \mathrm{K}} \approx 5{,}8.$$

b) $P_{mekaaninen} = 95\ \mathrm{W}$, $P_{jäähdytys} = ?$

Suorituskyky $\varepsilon = \frac{Q_2}{W}$ on määritelty energioiden avulla. Jaetaan sekä osoittaja että nimittäjä aikavälillä Δt, jolloin suorituskyky voidaan ilmaista tehojen avulla muodossa

$$\varepsilon = \frac{\frac{Q_2}{\Delta t}}{\frac{W}{\Delta t}} = \frac{P_{jäähdytys}}{P_{mekaaninen}}.$$

Silloin $P_{jäähdytys} = \varepsilon P_{mekaaninen} = 5{,}8 \cdot 95\ \mathrm{W} = 551\ \mathrm{W} \approx 550\ \mathrm{W}$.

Vastaus

a) Suorituskyky on 5,8.

b) Jäähdytysteho on 550 W.

Tiivistelmä

- Jäähdytyskoneen suorituskyky on kylmäsäiliöstä siirtyvän lämpömäärän suhde käytettyyn mekaaniseen energiaan.
- Lämpöpumppu toimii kuin jäähdytyskone. Tarkoitus on lämmittää lämpösäiliötä.

Perustehtävät

219. Selitä jääkaapin periaate energiavirtakaavion avulla.

220. **a)** Miksi jäähdytyskoneen tehokkuutta kuvaavassa suorituskyvyssä on järkevää laskea suhde kylmäsäiliöstä siirtyvän lämmön Q_2 ja käytetyn mekaanisen työn W välillä?

b) Miksi lämpöpumpun tehokkuutta kuvaavassa suorituskyvyssä on järkevää laskea suhde lämpösäiliöön siirrettävän lämmön Q_1 ja käytetyn mekaaniseen työn W välillä?

221. Pakastimen lämpötila on –18 °C ja huoneen +21 °C. Mikä on pakastimen suurin mahdollinen suorituskyky? Esim. 1

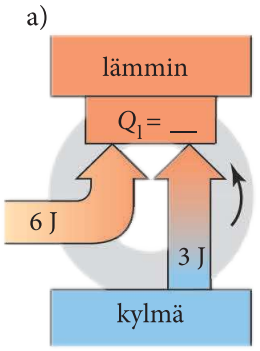
222. Jääkaapin suorituskyky eli kylmäkerroin on 2,5 ja teho 460 W.

a) Millä teholla jääkaapista siirtyy lämpöä pois, kun kompressori on käynnissä?

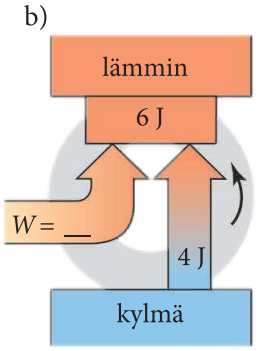
b) Millä teholla jääkaappi lämmittää huonetta?

223. Kaaviot esittävät jääkaapin energiavirtakaavioita. Päättele jokaisen jääkaapin tapauksessa puuttuvan suureen arvo.

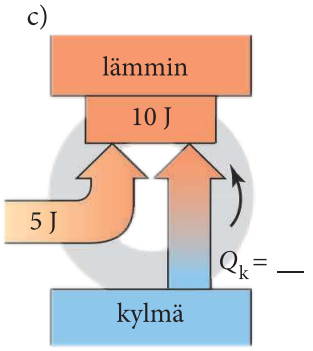
a)



b)



c)



224. Lämpöpumppu siirtää energiaa maaperästä huoneilmaan. Maaperän lämpötila on 6,0 °C ja huoneilman 21 °C.

a) Kuinka suuri lämpöpumpun maksimisuorituskyky on?

b) Lämpöpumpun todellinen suorituskyky on 2,8. Kuinka monta prosenttia se on maksimisuorituskyvystä? Esim. 1

225. Jääkaapin suorituskyky on 2,6. Jääkaapin lämpötila on 4 °C ja huoneen lämpötila 22 °C.

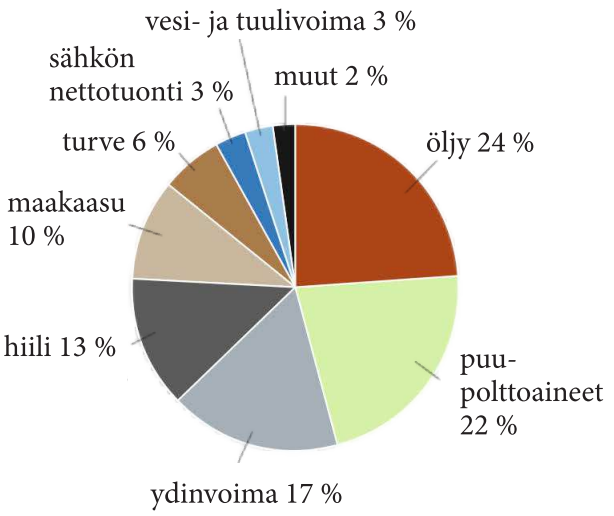
a) Kuinka monta prosenttia todellinen suorituskyky on maksimisuorituskyvystä?

b) Kuinka paljon jääkaappi kuluttaa energiaa, kun 0,50 kg huoneenlämpöistä kananlihaa jäähdytetään jääkaapin lämpötilaan? Kananlihan ominaislämpökapasiteetti on 3,32 kJ. Esim. 1

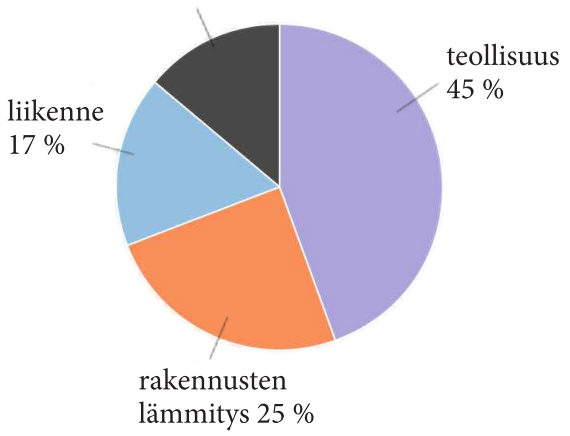
226. Miten huoneen lämpötila muuttuu, jos unohdat jääkaapin oven auki pitkäksi ajaksi?

16 Yhteiskunta tarvitsee energiaa

Energian kokonaiskulutus Suomessa energialähteittäin v. 2010



Energian loppukäytön jakautuminen sektoreittain v. 2010



Energiantarve kasvaa

Energiantarve on sidoksissa siihen, kuinka kehittynyt yhteiskunta on. Suomen kaltaisessa teknistyneessä yhteiskunnassa sekä teollisuus että kuluttajat käyttävät energiaa paljon enemmän kuin kehittyvissä maissa. Myös teollisuuden rakenne vaikuttaa energiantarpeeseen. Suomen teollisuudesta suuri osa on sellaista, jonka tuotteiden valmistukseen tarvitaan paljon energiaa.

Kotitalouksien ja teollisuuden lisäksi merkittävä energian käyttäjä on liikenne, joka käyttää vielä energianlähteenä lähes yksinomaan öljyä. Tulevaisuudessa öljyä korvaavat sähkö ja maakaasu.

Suomessa kotitalouksien suureen energiankulutukseen vaikuttaa merkittävästi maamme pohjoinen sijainti. Suuri osa kotitalouksien käyttämästä energiasta kuluu asuntojen lämmittämiseen.

Energiaa ei ole aina saatavilla siinä muodossa, jossa sitä tarvitaan. Siksi energia pitää yleensä muuntaa joko suoraan käyttökelpoiseen tai helposti siirrettävään muotoon. **Energialähteiden** sisältämän energian muuntamista haluttuun muotoon sanotaan **energian tuottamiseksi**. Energian tuotantolaitoksia kutsutaan **voimalaitoksiksi**, ja niissä tuotetaan yleensä sähköä tai lämpöä tai molempia.

Kivihiilellä toimivassa voimalaitoksessa kivihiileen sitoutunut kemiallinen energia muunnetaan sähkövirran välittämäksi energiaksi.

Energialähteen valitsemisen kriteerejä

- saatavuus
- siirrettävyys
- hinta
- riittävyys
- uusiutuvuus
- muunnettavuus
- puhtaus
- ympäristöystävällisyys
- energian käyttötarkoitus

Polttoaineesta vapautuva energia

$Q = Hm$,
jossa
H on polttoaineen lämpöarvo ja
m on polttoaineen massa.

Polttoaine	Lämpöarvo (MJ/kg)
vety	119,0
maakaasu	46,0
moottoribensiini	43,8
kevyt polttoöljy	42,5
dieselöljy	41,5
etanoli	26,9
kivihiili	25,5
kuivat koivuhalot	19,0
kuiva jyrsinturve	10,1

Polttoaineiden lämpöarvoja.

Energiaa tuotetaan monista energialähteistä

Energiaa tuotetaan useilla eri tavoilla monista eri energialähteistä. Energian tuotantotavan valitsemiseen vaikuttavat monet kriteerit. Maailmanlaajuisesti tärkeimpiä energialähteitä ovat nykyään öljy, hiili, maakaasu, uraani, virtaava vesi ja biomassa. Suomessa käytettävistä energialähteistä tärkeimmät ovat öljy, puupolttoaineet, uraani, hiili ja maakaasu.

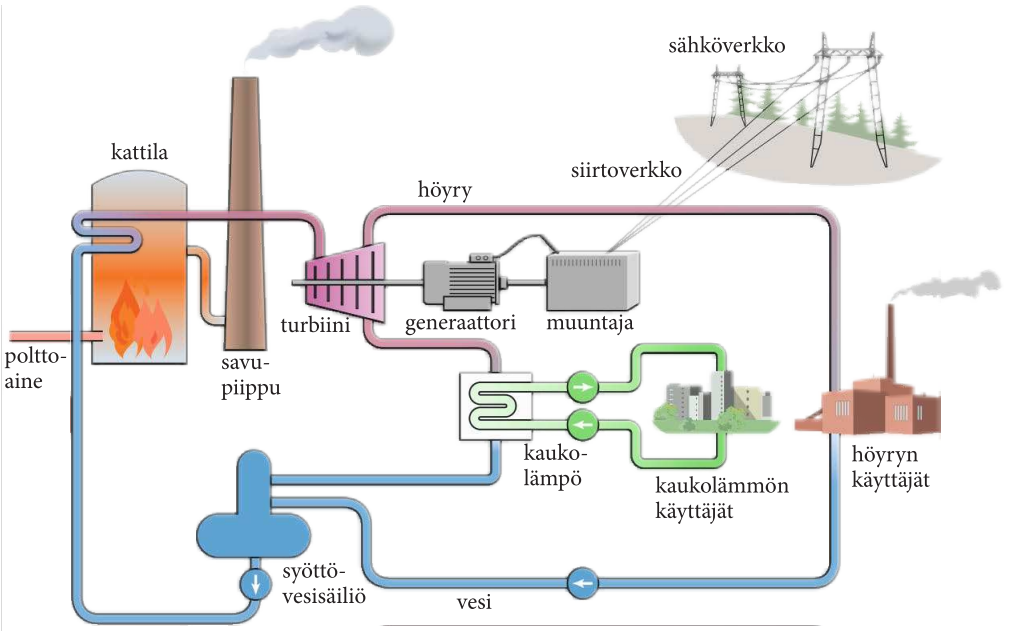
Energialähteistä puhuttaessa käytetään jakoa **primäärienergiaan** ja **sekundäärienergiaan**. Primäärienergia on jalostamattomista energialähteistä saatua energiaa, kuten tuulen liike-energiaa, veden potentiaalienergiaa auringon säteilyenergiaa, maahan sitoutunutta lämpöenergiaa, uraanin ydinten sidosenergiaa ja eri polttoaineiden kemiallista energiaa. Sekundäärienergia on jalostettua primäärienergiaa. Sen lähteitä ovat esimerkiksi bensiini ja polttoöljy. Myös sähkön ja kaukolämmön välityksellä siirretty energia on sekundäärienergiaa.

Monissa nykyisissä energian tuotantomuodoissa primäärienergia on jonkin polttoaineen kemiallista energiaa, joka vapautuu aineen palaessa. Usein myös ydinvoimaloiden energialähteenä olevaa uraania sanotaan ydinpolttoaineeksi. Tarkasti ottaen uraani ei ole polttoaine, koska energian vapautuminen ei perustu palamiseen: uraania ei ydinvoimaloissa polteta. Ydinvoimalan primäärienergia on uraanin ytimien sidosenergiaa. Polttoaineen palaessa vapautuvan energian määrää kuvaava suure on polttoaineen **lämpöarvo**. Sen yksikkö on J/kg.

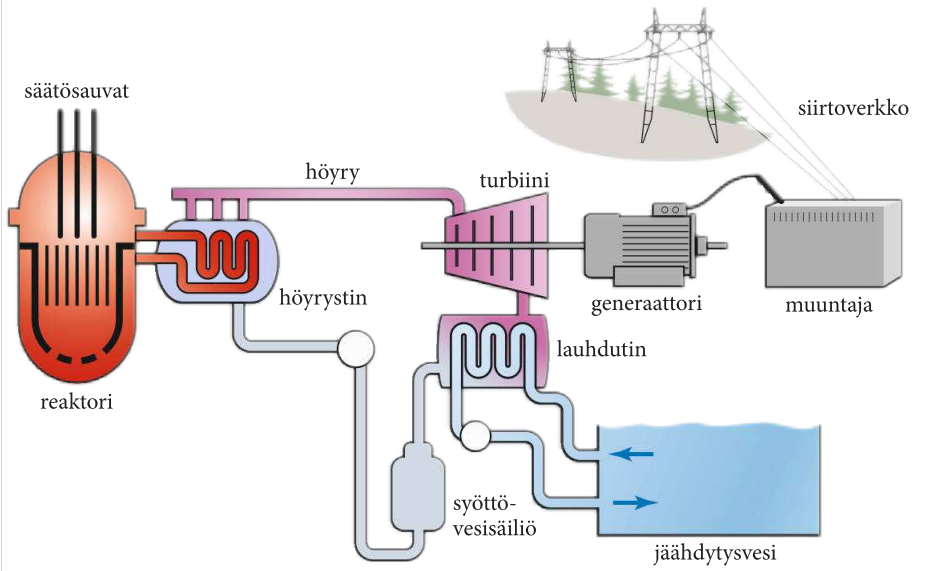
Energialähteet jaetaan uusiutuviin ja uusiutumattomiin

Primäärienergian lähteet voidaan jakaa **uusiutuviin** ja **uusiutumattomiin** energialähteisiin. Energialähde on uusiutumaton, jos käyttöön otettu energialähde ei korvaudu tai korvautuu erittäin hitaasti. Tärkeimmistä nykyään käytössä olevista energialähteistä uusiutumattomia ovat fossiiliset polttoaineet öljy, kivihiili ja maakaasu sekä ydinvoimalaitoksissa käytettävä uraani. Sen sijaan virtaava vesi ja puu sekä puunjalostusprosessissa puusta saatavat polttoaineet ovat uusiutuvia.

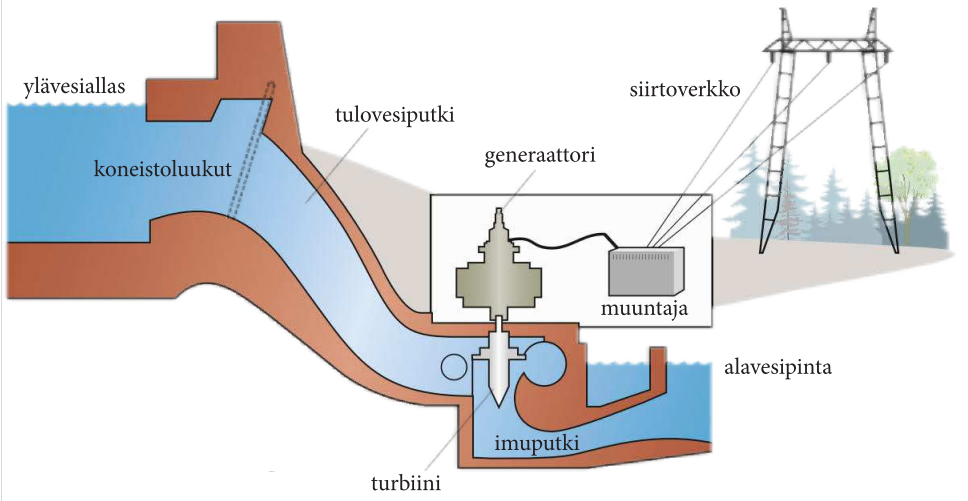
Uusiutumattomien energialähteiden jäljellä olevan määrän arvioiminen on varsin hankalaa. Fossiilisten polttoaineiden raaka-aineet ja uraani ovat piilossa maankuoressa, ja niitä löydetään edelleen lisää. Öljyn ja maakaasun tunnetut esiintymät riittävät nykytiedon mukaan noin 50 vuodeksi. Arviot käyttökelpoisen uraanimalmin riittävyydestä vaihtelevat sadan vuoden molemmin puolin. Kivihiilen arvioidaan riittävän noin 250 vuodeksi. Sen käytön toivotaan kuitenkin loppuvan paljon aikaisemmin, jotta ilmaston lämpeneminen saadaan kuriin.



Vastapainevoimalassa tuotetaan sähköä ja lämpöä. Höyryä voidaan siirtää putkissa myös voimalan lähistöllä oleviin teollisuuslaitoksiin, joiden prosesseissa tarvitaan höyryä.



Ydinvoimala on lämpövoimalaitos, jossa tarvittava energia saadaan uraaniytimien fissioreaktioissa. Reaktiossa vapautuva lämpö siirtyy reaktorissa olevaan veteen.



Vesivoimalassa veden potentiaalienergia muuntuu ensin veden liike-energiaksi ja sitten turbiinin pyörimisen liike-energiaksi. Generaattorissa pyörimisen energia muunnetaan sähkövirran välittämäksi energiaksi. Vesivoimaloiden hyötysuhde on korkea, koska energia on viimeiseen muutokseen asti mekaanista energiaa.

Energia muuntuu voimalaitoksissa

Valtaosa voimalaitoksista on **lämpövoimalaitoksia**, joissa polttoaineen vapauttaman energian avulla höyrystetään suljetussa kierrossa olevaa vettä. Lämpövoimalaitoksessa lämpöenergiaa muunnetaan ensin mekaaniseksi energiaksi ja sitten sähkövirran välittämäksi energiaksi. Sekä hiilivoimalat että ydinvoimalat ovat lämpövoimalaitoksia, ja niiden periaate on energian vapautumistapaa lukuun ottamatta sama.

Hiilivoimaloissa veden höyrystämiseen käytetty energia on peräisin polttoaineen kemiallisesta energiasta. Ydinvoimaloissa energia vapautuu fissioreaktioissa. Fissiossa raskas atomiydin halkeaa kahdeksi keskiraskaaksi ytimeksi ja samalla osa ydinten sidosenergiasta vapautuu. Vapautuva energia käytetään veden höyrystämiseen.

Lämpövoimalaitosta, joka tuottaa pelkästään sähköä, sanotaan **lauhdevoimalaksi**. Lauhdevoimalan hyötysuhde on suurimmillaankin alle 60 %. Valtaosa polttoaineen palaessa vapautuneesta energiasta menee siten hukkaan lauhduttimen kautta. Suurissa asutuskeskuksissa höyryvoimaloissa tuotetaan sähkön lisäksi kaukolämpöä, jolloin polttoaineen primäärienergiasta voidaan saada käyttöön yli 90 %. Tällaista voimalaa sanotaan **vastapainevoimalaksi**.

Sähkön ja lämmön yhteistuotantoon suunnitelluissa voimalaitoksissa turbiinista tulevan höyryn lämpötila on yli 100 °C, jolloin sillä voidaan lämmittää kaukolämpöverkon vettä. Tavallisessa lauhdevoimalassa höyryn lämpötila on turbiinin jälkeen yleensä alle 20 °C. Turbiinin loppupäässä ja lauhduttimessa on oltava hyvin matala paine, jotta vesihöyry ei ala tiivistyä ennen kuin se tulee lauhduttimeen.

Aaltovoimaloissa aaltojen liike-energia muuntuu sähkövirran välittämäksi energiaksi.

Tuulivoimaloissa tuulen liike-energia muuntuu sähkövirran välittämäksi energiaksi.

Uusiutuvien energialähteiden käyttöä kehitetään

Vedyn lämpöarvo on polttoaineista korkeimpia, ja maapallolla vetyä on veteen sitoutuneena käytännöllisesti katsoen rajattomasti. Vety on herkästi räjähtävä kaasu, ja siksi sen varastoimiseen ja kuljettamiseen liittyy ongelmia. Vetyä voidaan käyttää periaatteessa suoraan polttoaineena, mutta tällä hetkellä kehittynein vedyn käyttökohde on **polttokenno**. Polttokennossa vety reagoi hapen kanssa hallitusti ja vapautuva energia saa aikaan sähkövirran. Eräiden arvioiden mukaan polttokennotekniikalla toimivat autot yleistyvät merkittävästi tulevaisuudessa.

Aurinkoenergia, aaltoenergia ja tuulienergia ovat päästöttömiä. Niiden käytettävyyttä rajoittaa riippuvaisuus säästä. Aurinko-, aalto- ja tuulienergian tuottaminen on edelleen suhteellisen kallista, mutta niiden tekniikka kehittyy nopeasti. Aurinkoenergiaa muutetaan suoraan sähköksi aurinkopaneeleilla, joiden hyötysuhde on vielä pieni. Suurimpien tuulivoimaloiden teho on muutamia megawatteja. Aurinko- ja tuulivoimalat sopivat varsinkin syrjäisiin paikkoihin, joissa energiaa kulutetaan vähän ja joihin sähkönsiirtolinjaa ei kannata rakentaa.

Suomessa merkittävä uusiutuva energiavara on puu ja siitä saatavat niin sanotut puupolttoaineet. Osa puunjalostusteollisuudesta tuottaa sivutuotteillaan energiaa niin paljon, että sitä riittää myyntiin. Myös huomattava osa pientalojen lämmitykseen tarvittavasta energiasta saadaan puuta polttamalla. Puun polttamisessa syntyvä hiilidioksidi ei lisää ilmakehän hiilikuormaa eikä voimista kasvihuoneilmiötä. Puiden hiili on lähtöisin biosfääristä, ja se vapautuu ilmakehään hiilidioksidina myös silloin, kun puu lahoaa tai mätänee metsään.

Aurinkovoimaloissa auringon säteilyenergia muuntuu suoraan sähkövirran välittämäksi energiaksi.

Fuusio voi olla tulevaisuuden energiaratkaisu

Energiantuotannon kehittämisen syyt ovat varsin kaksijakoisia. Toisaalta yleisesti tunnustetaan, että energiantuotannossa on siirryttävä uusiutuviin ja vähemmän hiilidioksidia vapauttaviin tapoihin, mutta toisaalta tutut toimivat tekniset ratkaisut ja edullinen energia houkuttelevat lisäämään nykytekniikan mukaista energiantuotantoa.

Suurimmat toiveet kohdistuvat nykyään fuusioenergian ja vetyenergian valjastamiseen. Näiden lisäksi kehitetään voimakkaasti aurinko- ja tuulienergian tehokkaampaa käyttöä.

Fuusio on ydinreaktio, jossa kevyen alkuaineen ytimet yhdistyvät. Tällaisessa reaktiossa vapautuu ydinpolttoaineen massayksikköä kohti huomattavasti enemmän energiaa kuin fissioreaktiossa, johon nykyiset ydinvoimalat perustuvat. Fuusioreaktion lähtöaineet eivät ole radioaktiivisia, ja niitä on maapallolla ihmiskunnan energiatarpeiden tyydyttämiseksi vielä pitkään. Energiantuotantoon todennäköisimmin sopivassa fuusioreaktiossa ei synny ytimiä, jotka hajoaisivat radioaktiivisesti. Fuusioreaktiossa syntyy neutronisäteilyä, joka aiheuttaa reaktorin rakenteissa ydinreaktioita. Näissä reaktioissa syntyy radioaktiivisia ytimiä. Fissioreaktorissa radioaktiivisia aineita on kuitenkin moninkertaisesti fuusioreaktoriin verrattuna.

Fuusioreaktorin valmistamisessa on edelleen vaikeita teknisiä ongelmia, joiden ratkeamisesta tehdyt ennustukset ovat osoittautuneet jatkuvasti liian optimistisiksi.

Nykyiset ydinvoimalat ovat fissioreaktioon perustuvia.

Esimerkki 1 — Voimalaitoksen hyötysuhde

Oulujoessa sijaitseva Pyhäkosken voimalaitos on yksi Suomen suurimmista vesivoimalaitoksista. Veden putouskorkeus on 32,4 m, ja turbiinien läpi virtaa vettä enimmillään 450 m^3/s.

a) Kuinka suuri on voimalaitoksen hyötysuhde, jos sen teho on suurimmillaan 120 MW?

b) Mitkä tekijät pienentävät hyötysuhdetta?

Ratkaisu

a) $h = 32{,}4$ m, $P = 120$ MW, $\eta = ?$

Alussa energia on voimalan yläpuolella olevan veden potentiaalienergiaa,

$$E_{\text{otto}} = E_{\text{p}} = mgh.$$

Voimalan ottoteho on siten

$$P_{\text{otto}} = \frac{E_{\text{otto}}}{\Delta t} = \frac{mgh}{\Delta t} = \frac{m}{\Delta t} gh.$$

Lausekkeessa oleva termi $\frac{m}{\Delta t}$ ilmaisee voimalan läpi virtaavan veden määrän sekunnissa eli ilmoitetun virtaaman. Voimalaitoksen hyötysuhde on siten

$$\eta = \frac{P_{\text{hyöty}}}{P_{\text{otto}}} = \frac{P_{\text{hyöty}}}{\frac{m}{\Delta t} gh}.$$

Käytetään veden tiheydelle arvoa 1 000 kg/m^3. Sijoittamalla tehtävässä annetut lukuarvot saadaan hyötysuhteeksi

$$\eta = \frac{120 \cdot 10^6 \text{ W}}{450 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 32{,}5\text{m}}$$

$$= 0{,}836405 \approx 0{,}84.$$

b) Hyötysuhdetta pienentävät turbiinien ja generaattoreiden akselien kitka ja veden virtausvastus putkissa sekä generaattorin hyötysuhde.

Vastaus

a) Pyhäkosken voimalaitoksen hyötysuhde on 0,84 eli 84 %.

Tiivistelmä

- Energian tuottaminen on energialähteiden sisältämän energian muuntamista haluttuun muotoon.
- Primäärienergia on jalostamattomista energialähteistä saatua energiaa.
- Sekundäärienergia on jalostettua primäärienergiaa.
- Primäärienergian lähteet jaetaan uusiutuviin ja uusiutumattomiin energialähteisiin.
- Lauhdevoimala tuottaa pelkästään sähköä.
- Vastapainevoimala tuottaa lämpöä ja sähköä.
- Fuusio on ydinreaktio, jossa kevyen alkuaineen ytimet yhdistyvät ja samalla vapautuu runsaasti energiaa.

Perustehtävät

227. Luettele kotonasi käytettäviä
a) primäärienergialähteitä
b) sekundäärienergialähteitä.

228. Laadi taulukko eri energialähteistä ja tarkastele niiden saatavuutta, siirrettävyyttä, hintaa, riittävyyttä, uusiutuvuutta ja ympäristöystävällisyyttä.

229. Kuinka monta kiloa koivuhalkoja tarvitaan tuottamaan sama energia kuin kilolla polttoöljyä?

230. Selvitä Internetin eri lähteistä, mitkä ovat tällä hetkellä arviot kivihiilen ja öljyn riittävyydestä.

231. Selvitä Internetin eri lähteistä, mikä on tällä hetkellä fuusioreaktorin kehitysaste.

232. Vety olisi erittäin hyvä polttoaine esimerkiksi autoissa.
a) Mitä etua on vedyn käytöstä nykyisiin polttoaineiseen verrattuna?
b) Selvitä Internetistä vetymoottorin nykyistä kehitysvaihetta.

233. Voimalaitosten päästöt ja syntyvät jätteet ovat energiantuotannon suurimpia ongelmia.
a) Mitä päästöjä ja jätteitä syntyy ydinvoimalaitoksesta, turvevoimalaitoksesta ja vesivoimalaitoksesta?
b) Miten näitä jätteitä käsitellään ja päästöjä pyritään pienentämään?

234. Kuvaile ydin- ja vesivoimalaitoksen riskejä, jotka liittyvät
a) raakaenergian hankintaan
b) voimalaitosten rakentamiseen
c) energian tuottamiseen
d) jätteiden käsittelyyn.

Soveltavat tehtävät

235. Mitä riskejä hiilivoimalaitoksen toiminnasta voi aiheutua
a) yksilölle
b) ympäristölle
c) yhteisölle?

236. Imatran vesivoimalaitoksen veden pudotuskorkeus on 25 m. Turbiinien läpi virtaa vettä enimmillään 800 m^3/s. Kuinka suuri voimalaitoksen hyötysuhde on, kun laitoksen teho on suurimmillaan 168 MW?

237. Sodankylässä sijaitsevan Porttipahdan tekoaltaan vesivoimalan putouskorkeus on 30,0 m ja virtaama 140 m^3/s. Millä teholla voimalaitos tuottaa energiaa, jos sen hyötysuhde on 0,85?

238. Meri-Porin lauhdevoimalaitoksen suurin teho on 565 MW ja hyötysuhde 43,5 %. Kuinka paljon kivihiiltä voimalaitoksessa kuluu enimmillään tunnissa, jos hiilen lämpöarvo on 25,5 MJ/kg?

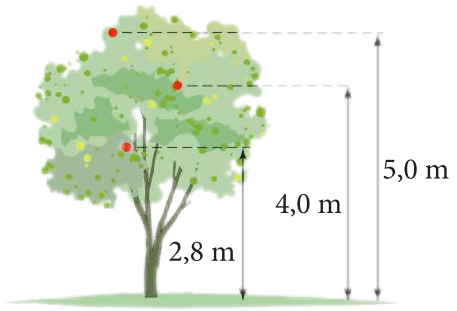
Kertaustehtävät

Luku 1

239. Eräässä lineaarisessa lämpöasteikossa X vesi kiehuu lämpötilassa –53,5 °X ja jäätyy lämpötilassa –170 °X. Paljonko tämä mittari näyttää, kun lämpötila on 340 K?

Luku 2

240. Omenapuussa on kolme omenaa kuvan osoittamalla tavalla. Omenoiden massa on 150 g.



Laske omenoiden potentiaalienergia, kun potentiaalienergian nollatasona on

a) maanpinta

b) ylimmän omenan painopisteen taso.

c) Miten nollatason valitseminen vaikuttaa putoavan omenan potentiaalienergian muutokseen?

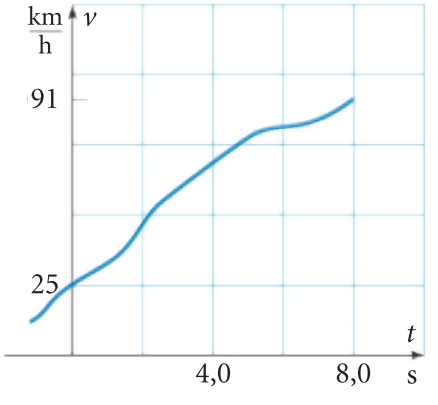
241. Vesipisara irtoaa vuotavasta hanasta ja putoaa altaan pohjalle.

a) Miten pisaran potentiaalienergia muuttuu putoamisen aikana?

b) Piirrä tilannetta kuvaava energiakaavio, kun alkutila on hetki ennen pisaran putoamista ja lopputila hetki juuri ennen sen osumista altaan pohjalle.

c) Millä nopeudella pisara osuu altaan pohjalle, kun putoamismatka on 45 cm?

242. Linnun vauhti muuttuu syöksyn aikana oheisen kuvion mukaisesti. Kuinka suuri linnun liike-energian muutos on aikavälillä 0 s…8 s? Linnun massa on 560 g.



Luku 3

243. Sohvaa työnnetään tasaisesti vaakasuoralla lattialla 3,7 m:n matka.

a) Kuinka suuren työn työntävä voima tekee, kun sen suuruus on 87 N?

b) Miten sohvan liike muuttuisi, jos työntävä voima olisi hetkellisesti 105 N?

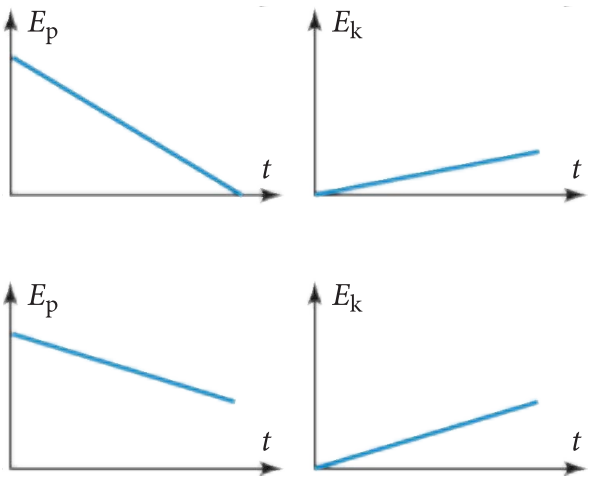
244. Auton massa on 1 120 kg. Kuinka suuren työn autoon vaikuttava kokonaisvoima tekee, kun auton vauhti pienenee arvosta 105 km/h arvoon 81 km/h?

245. Lapsi lähtee levosta liukumaan alas jäämäkeä, jonka korkeus on 8,9 m ja pituus 56 m. Kuinka suuri nopeus mäen alla on, jos pulkan ja lapsen yhteinen massa on 23 kg ja keskimääräinen kitkavoima 12 N?

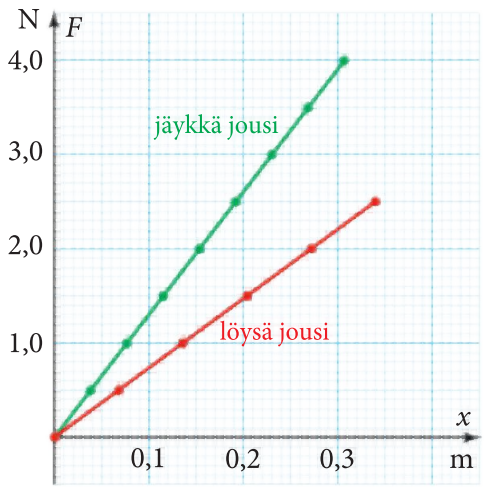
246. Eräässä oppilastyössä kappaleen mekaanisen energian ei havaittu säilyvän.

a) Kumpi graafisista esityksistä kuvaa työn tuloksia oikein?

b) Piirrä valitsemaasi esitystä täydentävä systeemiin vaikuttavaa voimaa kuvaava graafinen esitys.



247. Kuvaaja esittää jousen venyttämiseen käytettävää voimaa F eri venymillä x. Kuinka suuren työn jousta vetävä voima tekee, kun jousta venytetään 0,25 m?



Luku 4

248. Poika kiipeää tikkaita pitkin katolle 11 sekunnissa. Laske nousuteho, kun pojan massa on 56 kg ja räystäs on 3,5 metrin korkeudella maanpinnasta.

249. Seinäelementin massa on 1 200 kg. Nosturi nostaa sen 11 metrin korkeudelle 1 minuutissa 7 sekunnissa.

a) Kuinka suuri nosturin nostoteho on?

b) Mikä nosturin hyötysuhde on, jos se ottaa sähköverkosta noston aikana energiaa 160 kJ?

Luku 5

250. Teräspultti on juuttunut alumiinikappaleeseen. Helpottaako rakenteen lämmittäminen (esim. kuumailmapuhaltimella) pultin irtoamista? (Yo kevät 1995, teht. 2c)

251. Harrastelijarakentaja päätti käyttää puutarhan tukimuurin rakenteissa 4,0 m pitkien betoniraudatankojen sijasta samanmittaisia alumiinitankoja, joita hän oli saanut kierrätyskeskuksesta edullisesti. Valu suoritettiin kesällä +23 °C:n lämpötilassa. Seuraavana talvena lämpötila oli –30 °C ja betonirakenne murtui. Selvitä, miksi näin kävi ja miten tilanne olisi ollut vältettävissä.

252. **a)** Nesteen tilavuuden lämpötilakerroin halutaan määrittää mahdollisimman tarkasti pitkäkaulaista lasipulloa käyttäen. Tee selkoa koejärjestelyistä.

b) Kun pullo on täytetty pakkasnesteellä (t = 20,0 °C) kaulassa olevan merkkiviivaan asti, nesteen tilavuus on 250,6 ml. Pullon kaulan sisähalkaisija on 5,15 mm. Kun nestettä lämmitetään, sen pinta nousee alla olevan taulukon mukaisesti. Määritä sopivaa graafista esitystä hyväksikäyttäen pakkasnesteen tilavuuden lämpötilakerroin. (Yo syksy 1999, teht. 15)

***t* (°C)**	20,0	22,9	25,9	29,2	31,9	35,3
***h* (mm)**	0	28,3	58,5	83,8	114,8	149,1

Luku 6

253. Vesi kohdistaa kampelaan varsin suuren voiman, kun se lojuu meren pohjalla muutaman kymmenen metrin syvyydellä. Miksi kampela ei muserru mainitun voiman vaikutuksesta?

254. Imukuppia vedetään irti ikkunasta jousivaa'alla. Imukuppi irtoaa, kun voima saavuttaa arvon 12 N. Kuinka suuri ilmanpaine on imukupin sisällä juuri ennen imukupin irtoamista? Ympyrän muotoisen imukupin säde on 4,5 cm.

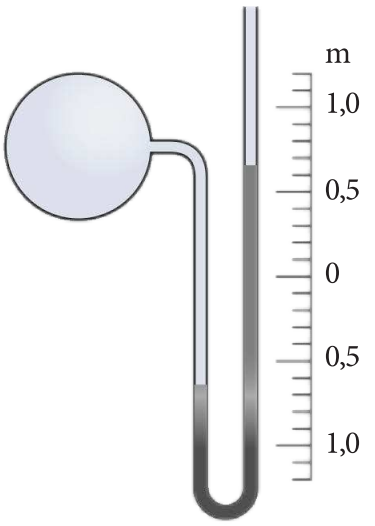
255. Eräässä autokorjaamon nosturissa painetta nostetaan pumppumännän puolella paineilmalla. Nosturin kuormamännän halkaisija on 24,0 cm, ja pumppumännän halkaisija on 8,0 cm. Kuinka suuri ylipaine paineilmalla on tuotettava, kun pumpulla nostetaan autoa, jonka massa on 1 050 kg?

Luku 7

256. Vedellä osittain täytetyn U-putken toiseen haaraan kaadetaan 5,0 cm öljyä, jonka tiheys on 850 kg/m^3. Kuinka paljon vesi nousee toisessa haarassa?

257. Tavallinen ihminen voi saada keuhkoihinsa 80 mmHg:n alipaineen, kun ympärillä on ilmaa. Kuinka syvällä vedessä voi hengittää vedenpinnalle johdetun putken kautta?

258. Kaasusäiliössä olevan kaasun painetta mitattiin avoimella U-putkimanometrilla, jolloin saatiin kuvan mukainen mittaustulos. Putkessa oleva neste on elohopeaa, ja ilmanpaine on 1 015 hPa. Määritä säiliössä olevan kaasun paine.

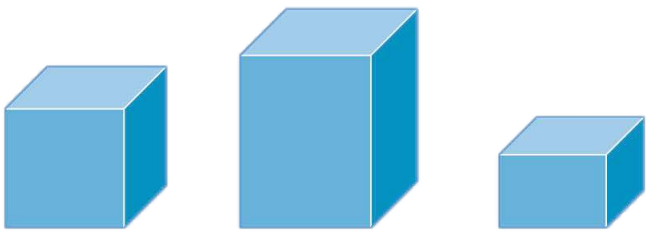


Luku 8

259. Pakastimen avaaminen on vaikeaa muutaman sekunnin kuluttua siitä, kun ovi on suljettu. Pakastinkaapin sisältämän ilman lämpötila on sulkemishetkellä –2 °C. Se laskee nopeasti arvoon –10 °C. Kuinka suurella voimalla ovi painautuu kiinni pakastimen runkoon? Oven leveys on 0,50 m ja korkeus 1,0 m.

260. Suljetussa astiassa on kaasua. Systeemin tilaa muutetaan niin, että lämpötila pysyy vakiona.

a) $V = 1\ \text{l}$ **b)** $V = 2\ \text{l}$ **c)** $V = 0{,}5\ \text{l}$



Missä astioista on suurin paine?

261. Kaasun paineen ja tilavuuden välistä riippuvuutta vakiolämpötilassa 22 °C tutkittiin painemittariin liitetyn injektioruiskun avulla. Kaasu puristettiin aluksi pieneen tilavuuteen, jonka jälkeen tilavuutta muutettiin mäntää siirtämällä. Mittauksessa saatiin oheisen taulukon mukaiset tulokset.

Tilavuus (ml)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Paine (kPa)	318	212	158	126	104	89,9	78,5

Määritä sopivaa kuvaajaa käyttäen moolinen kaasuvakio. Ruiskussa oli ideaalikaasun tavoin käyttäytyvää kaasua $0{,}26 \cdot 10^{-3}$ moolia.
(Yo kevät 1994, teht. 11)

262. Kaasupullossa on kaasua 23 bar:n paineessa. Pullon tilavuus on 12 litraa. Kuinka paljon kaasua purkautuu ulos pullon korkin rikkoutuessa?

263. Sylinterissä olevaa ilmaa puristettiin niin hitaasti, ettei lämpötila muuttunut. Paineen ja lämpötilan mittaustulokset on esitetty oheisessa taulukossa.

p **(kPa)**	110	124	142	164	197	246
V **(l)**	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0

Piirrä kuvaajat, joiden perusteella voidaan päätellä, kuinka hyvin ilma noudatti tässä kokeessa Boylen lakia.

264. Vetykaasulla toimivan kulkuneuvon vetysäiliön tilavuus on 50 l. Säiliössä on alkutilanteessa vetyä paineessa 150 bar ja lämpötilassa 20 °C. Ajon aikana säiliöstä virtaa vetyä paineenalennusventtiilin läpi moottoriin, jolloin vedyn paine laskee ulkoilman paineeseen 1,02 bar. Moottori kuluttaa minuutissa 60 l vetyä. Kuinka kauan kulkuneuvo on ollut liikkeessä, kun ajon päätyttyä paine vetysäiliössä on laskenut arvoon 45 bar? Vety voidaan olettaa näissä oloissa ideaalikaasuksi.
(Yo syksy 1996, teht. 5)

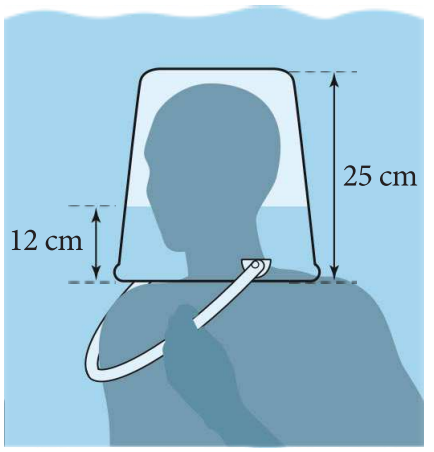
265. Heliumkaasua jäähdytettiin ja samalla mitattiin sen painetta. Tulokset on esitetty taulukossa.

T **(°C)**	–10	–20	–35	–75	–135	–175
p **(kPa)**	101,6	94,1	88,5	73,6	49,8	36,3

a) Piirrä kuvaaja, joka esittää kaasun painetta lämpötilan funktiona.

b) Arvioi kuvaajasta absoluuttisen nollapisteen arvo celsiusasteina.

266. Kuinka syvälle voidaan sukeltaa sanko päässä, kun oletetaan, että sankoon voi nousta vettä 12 cm ennen kuin vesi peittää nenän? Sanko on 25 cm korkea. Pohdi, voisiko sukelluksen toteuttaa.



Luku 10

267. Vedenkeittimessä lämmitetään 0,90 litraa vettä. Veden alkulämpötila on 17 °C ja loppulämpötila 95 °C. Kannun teho on 1 100 W, ja sen lämpökapasiteetti on 0,45 kJ/°C. Oletetaan, että kannun hyötysuhde on 80 %. Laske, kuinka kauan veden lämmitys kestää.

268. Rautakappale, jonka massa on 2,0 kg ja lämpötila 75 °C, pudotetaan 5,2 litraan vettä. Veden lämpötila on 25 °C. Mikä on systeemin loppulämpötila?

Luku 11

269. Termospullossa on 0,70 kg vettä, jonka lämpötila on 25 °C. Pulloon kaadetaan 0,52 kg jääpaloja, joiden lämpötila on 0 °C, ja pulloa sekoitetaan. Kuinka paljon jäätä jää sulamatta?

Luku 12

270. Huoneiston tilavuus on 180 m^3. Lämpötila on 22 °C ja suhteellinen kosteus 45 %.

a) Laske ilmassa olevan veden määrä.

b) Kuinka paljon tarvitaan vesihöyryä lisää, jotta suhteellinen kosteus olisi 60 %?

Luku 13

271. Kuinka suuren työn laajeneva kaasu tekee, kun mäntä liikkuu 0,15 m normaali-ilmanpaineessa? Männän halkaisija on 8,2 cm.

272. Lämpövoimakoneen Carnot-hyötysuhde on 45 %. Kylmäsäiliön lämpötila on 12 °C. Mikä on lämpösäiliön lämpötila?

273. Lämpövoimakone ottaa joka kierroksella 120 kJ lämpöä lämpösäiliöstä ja luovuttaa siitä 75 kJ kylmäsäiliöön.

a) Laske koneen hyötysuhde.

b) Koneen hyötysuhde on 55 % maksimaalisesta hyötysuhteesta. Mikä on silloin kylmäsäiliön lämpötila, jos lämpösäiliön lämpötila on 750 K?

Luku 14

274. Jos laitat hajuvesipullon huoneen keskelle ja poistat siitä korkin, voit pian haistaa hajuveden tuoksun koko huoneessa. Palaavatko kaikki hajuvesimolekyylit koskaan kerralla takaisin hajuvesipulloon? Jos ne eivät palaa, niin mikä on syynä tähän?

Luku 15

275. Selitä jääkaapin toimintaperiaate. Millaisia lämpöopillisia prosesseja jääkaapin toiminnassa tapahtuu?

276. Jääkaapin suorituskyky on 2,6 ja teho 510 W.

a) Millä teholla jääkaapista siirtyy lämpöä pois?

b) Millä teholla jääkaappi lämmittää huonetta?

277. Lämpöpumppu siirtää energiaa maaperästä huoneilmaan. Maaperän lämpötila on 6,0 °C ja huoneilman 20,5 °C.

a) Kuinka suuri lämpöpumpun maksimisuorituskyky on?

b) Lämpöpumpun todellinen suorituskyky on 2,8. Kuinka monta prosenttia se on maksimisuorituskyvystä?

Luku 16

278. Takassa poltetaan 3,5 kg puita, joiden lämpöarvo on 9,5 MJ/kg. Kuinka paljon takan lämpötila nousee, jos 45 % lämmöstä jakautuu tasaisesti takkaan? Takan massa on 650 kg, ja tiilen ominaislämpökapasiteetti on 0,80 kJ/(kg K).

Tehtävien vastaukset

1. **a)** –18 °C … –21 °C
   b) 500 °C … 1 000 °C
   c) 2 700 °C, 150 °C … 350 °C
   d) 55 °C … 65 °C
5. –270,42 °C
6. **a)** 310 K, 221,7 K
   b) 88,7 °C
   c) 88,7 K
7. **a)** 178,9 K
   b) 1 808 K
   c) 599 K
14. 56,7 °C
15. **a)** 102 °C
   b) –173 °C
20. 2,6 mJ
21. **a)** 4,0 kJ
   b) 0 J
   c) 4,0 kJ
22. **b)** 105 J
   c) 0,32 m
23. **a)** A ja C
28. 6,3 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
29. **a)** 14 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
   b) 14 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
30. 22 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
31. **b)** C
32. **b)** 21 kg
36. –93 J
37. 1,6 kg
38. 0,93 J
39. **a)** 34 J
   b) 0 J
   c) 0 J
41. A
43. **d)** 1,1 m
44. **a)** 230 kJ
   b) 4,5 kN
45. **a)** 2,0 m
   b) 23 J
   d) 3,0 J
   e) 2,2 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
46. **b)** 380 N
47. 22 m
48. 0,20 kN
49. **a)** 48 mJ
50. 9,2 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
55. 1,4 MJ
56. 68 s
57. 4,5 kW
58. **a)** 880W
   b) 15 s ja 3 min 15 s
59. 0,20 kW
61. 1,3 s
62. 510 W
63. 56 kW
64. 11 kW
65. 86 %
70. 4,18 cm
71. 26 °C
72. 2,731 cm
76. $2{,}27 \cdot 10^{-5}$ 1/°C
77. 240 °C
78. **b)** 36 %
   c) $1{,}8 \cdot 10^{-5}$ 1/°C
80. 14,99 m
81. $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ 1/°C
86. a
88. 652 Pa
89. 2,5 MPa
90. 125 N
92. 24 kPa
93. 1,7 N
94. 13 kN
95. 160 kPa ja 260 kPa
96. **a)** 180 N
   b) 12 000 m/s^2
97. 1,8 kN
98. 1,6 kPa
99. **a)** 62 kPa
   b) 5,2 kN
100. 51 kPa
105. 4,5 MPa
106. 36 m
107. 17 kPa
109. 25 kN
110. **a)** 14,3 kN
   b) 14,9 kN
   c) 625 N
111. 760 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
112. $5{,}3 \cdot 10^{18}$ kg
113. **a)** 3,3 kPa
   b) 33 cm
114. 1 019 hPa
115. **b)** 431 hPa
116. **a)** 250 kN
117. **b)** 1,09 m
120. a
121. a
122. 17 mm^3
125. **a)** 160 mol
   b) 330 g
   c) 13 g/dm^3
126. 71 mol ja 2,0 kg
127. 0,087 kg/m^3
128. 400 kPa
129. 3 100 l
134. b
135. b
136. 5,9 l
137. 190 l
138. 0,32 Mpa
140. 21 m
141. **c)** 36 kPa
142. 147 bar
143. 5,0 N
144. 20
145. 1 000 hPa
146. –270 °C
147. 1,8 kg/m^3
150. 18 kJ
151. **a)** 74 °C
   b) 6,7 °C
153. **a)** 66 kJ
154. 7,5 min
155. **a)** 37 °C
156. 3,3 kg
157. 48,5 °C
158. **a)** 12 kJ
159. **a)** 29
   b) 24
   c) 300
160. **b)** 58 ml
161. **a)** 0,38 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$
162. 100 km/h
163. 670 kJ
164. A
165. 1,5 kJ/°C

171. 2,0 kg

174. **a)** 0 °C
b) 100 °C
c) 105 J
d) 50 °C
e) 2 100 $\frac{\text{J}}{\text{kg °C}}$
f) 340 J
g) 340 kJ/kg
h) 4 200 $\frac{\text{J}}{\text{kg °C}}$
i) 19 min

175. 1,1 kg

176. **b)** 5,5 °C ja 80 °C
c) 130 kJ/kg ja 400 kJ/kg

178. **a)** 230 kJ
b) 4,1 kg

179. 0 °C

180. 230 g ja 7,0 h

181. 4,6 kJ/(kg °C) ja 2 400 kJ/kg

182. 14 g

185. **b)** 90 °C
c) 1 700 hPa

188. **a)** 2,0 kg
b) 0,4 kg

189. 41 %

190. 0 °C

196. **a)** prosessissa 2

197. **b)** 8 kJ

199. 7,6 °C

200. 98 °C

201. 110 J

203. **a)** $W = 0$ J
b) $W = -2{,}1$ kJ
c) $W = 1{,}5$ kJ

204. $3 > 1 = 2 > 4$

205. 0,61

206. 194 °C

207. 27 °C

208. **a)** 0,2
b) 510 K

209. ei

211. $3{,}0 \cdot 10^5$ Pa

212. $Q_k = 3$ J, $Q_l = 16$ J, $W = 4$ J

214. **a)** d
b) a

221. 6,5

222. **a)** 1 200 W
b) 1 600 W

223. 9 J, 2 J, 5 J

224. **a)** 20
b) 14 %

225. **a)** 17 %
b) 11 kJ

229. 2,24 kg

236. 86 %

237. 35 MW

238. 183 tn

239. –92 °X

240. **a)** 4,1 J, 5,9 J, 7,4 J
b) –3,2 J, –1,5 J, 0 J

241. 3,0 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

242. 170 J

243. 320 J

244. 160 kJ

245. 11 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

247. 0,23 J ja 0,41 J

248. 170 W

249. **a)** 1,9 kW
b) 81 %

252. **b)** $8{,}1 \cdot 10^{-4}$ 1/°C

254. 990 hPa

255. 230 kPa:n ylipaine

256. 2,1 cm

257. 1,1 m

258. 270 kPa

259. 1,5 kN

260. c

261. 8,3 J/(mol K)

262. 260 l

264. 1 h 26 min

265. 0,8 kg

266. 9,5 m

267. 6,2 min

268. 27 °C

269. 0,32 kg

270. **a)** 1,6 kg
b) 0,5 kg

271. 80,0 J

272. 240 °C

273. **a)** 0,38
b) 240 K

276. **a)** 1 300 W
b) 1 800 W

277. **a)** 20,3
b) 14 %

278. 29 °C

Hakemisto

0-taso 17

A

absoluuttinen kosteus 107
absoluuttinen nollapiste 75
ainemäärä 69
alipaine 54
Avogadron vakio 69

B

Boylen laki 73

C

Carnot-hyötysuhde 117
celsiusaste 8
Charlesin laki 75

D

dynaaminen tasapaino 104
dynaaminen tasapainotila 105

E

energia 12
  kineettinen energia 16
  liike-energia 16, 17
  lämpö 12, 85
  lämpöenergia 12
  mekaaninen energia 18
  potentiaalienergia 17
  sisäenergia 11, 112
energialähde 132
  primäärienergia 133
  sekundäärienergia 133
  uusiutumaton energialähde 133
  uusiutuva energialähde 133
energian huononeminen 124
energian tuottaminen 132
ensimmäisen lajin ikiliikkuja 37, 125
entropia 124

F

faasikaavio 104
fuusio 136

G

Gay-Lussacin laki 76
graafinen integrointi 27

H

haihtuminen 105
hydrauliikka 56
hydrostaattinen paine 61
hydrostaattinen paradoksi 61
hyötysuhde 38, 117
härmistyminen 94
höyry 104
höyrynpaine 105
höyrystyminen 94
höyrystymiskäyrä 104
höyrystymislämpö 95

I

ideaalikaasu 68
ideaalikaasun tilanyhtälö 69
ilmalämpöpumppu 129
ilmankosteus 107
ilmanpaine 60
ilmanvastus 19
ilmapuntari 62
ilmaston lämpeneminen 133
imupumppu 63
isobaarinen prosessi 114
isokoorinen 75
isoterminen 73

J

jäähdytyskone 127
jäähdytyskoneen suorituskyky 127
jääkaappi 128

K

kaasujen yleinen tilanyhtälö 68
kaasun tilanmuutos 115
kalorimetri 84
kalteva taso 37
kappaleen lämpökapasiteetti 86
kastepiste 107
kelvin 8
kiehuminen 105
kiehumispiste 94
kiertoprosessi 116
kolmoispiste 104
kriittinen piste 104
kuormitus 54
kylläisen höyryn paine 105

L

latentti lämpö 94
lauhdevoimala 134
lämmön säilyminen 86
lämmöneriste 43
lämmönjohde 43
lämmön siirtyminen 43
  johtuminen 43
  kuljetus 43
  säteily 43
lämpöarvo 133
lämpökapasiteetti 86
lämpölaajeneminen 44
lämpömittari 9
lämpömäärä 85
lämpöopin ensimmäinen pääsääntö 11, 113
lämpöopin kolmas pääsääntö 125
lämpöopin nollas pääsääntö 84
lämpöopin toinen pääsääntö 123
lämpöoppi 6, 8
lämpöpumpun suorituskyky 128
lämpötasapaino 8
lämpötila 8
lämpövoimakone 116
lämpövoimalaitos 134

M

maalämpöpumppu 128
makrotaso 10
maksimikosteus 107
mekaanisen energian säilymislaki 19
mekaniikan energiaperiaate 28
mekaniikka 6
mikrotaso 10
moolimassa 69
moolinen kaasuvakio 69
moolitilavuus 69
muuttuvan voiman tekemä työ 27

N

normaali-ilmanpaine 54, 60

O

olomuodonmuutoslämpö 94
olomuodonmuutoslämpötila 104
olomuoto 93
  kiinteä 93
  neste 93
  kaasu 93, 104
ominaishöyrystymislämpö 95
ominaislämpökapasiteetti 85
ominaissulamislämpö 95

P

paine 54
paineen mikromalli 55
Pascalin laki 55
pinta-alan lämpötilakerroin 46
pituuden lämpötilakerroin 45
polttokenno 135
primäärienergia 133
pumppu 63

R

rakenneosa 93

S

sekundäärienergia 133
sublimoitumiskäyrä 104
suhteellinen kosteus 107
sulamiskäyrä 104
sulamislämpö 95
sulamispiste 94
suorituskyky 128
systeemi 9
  avoin systeemi 9
  eristetty systeemi 9
  suljettu systeemi 9

T

tasapaino 104
tasapainokäyrä 104
teho 36
teoreettinen hyötysuhde 117
termodynaaminen tasapaino 123
termodynamiikka 8
tiivistyminen 94
tila 10
tilanmuutos 10
tilanmuuttuja 10, 67
tilanyhtälö 45
tilasuure 67
tilavuuden lämpötilakerroin 46
toisen lajin ikiliikkuja 125
työ 26

V

vakiovoiman tekemä työ 26
vastapainevoimala 134
vertailutaso 17
vipu 37
voima 26
  kitkavoima 27
  paino 27
  tukivoima 27
voimalaitos 132
vuorovaikutus 27
väkipyörä 37

Y

yksinkertainen kone 37
ylipaine 54
ympäristö 9

Physica 2 kuvalähteet:

kansi:	Yläkuva: Colourbox ja Alakuva: Kuvatoimisto Vastavalo
s. 6	Markus Juvonen
s. 7	Timo Suvanto
s. 8	Mario Pessaris / PantherMedia
s. 9	Timo Suvanto
s. 10 vas.	Viacheslav Krisanov / PantherMedia
s. 10 oik.	Timo Suvanto
s. 11 ylh.	Colourbox
s. 11 alh.vas.	Norberto Mario Lauria / PantherMedia
s. 11 alh.kesk.	Salvador Burciaga / PantherMedia
s. 11 alh.oik.	Viacheslav Krisanov / PantherMedia
s. 12 ylh.	Mia Saarinen / Sanoma Pro Oy
s. 12 kesk.	Sergej Razvodovskij / PantherMedia
s. 12 alh.	Martin Kierstein / Colourbox
s. 14	Timo Suvanto
s. 15	Timo Suvanto
s. 16	Timo Suvanto
s. 18	Timo Suvanto
s. 20	Benis Arapovic / PantherMedia
s. 26	PCN Photography / Alamy / AOP
s. 30	PantherMedia
s. 36	PantherMedia
s. 40	Ernest Prim / PantherMedia
s. 42 ylh.	Timo Suvanto
s. 42 alh.vas.	Sanoma Pro Oy
s. 42 alh.oik.	RJH_RF / Alamy / AOP
s. 44 ylh.	Timo Suvanto
s. 44 alh.vas.	Timo Suvanto
s. 44 alh.oik.	Evgeny Stetsko / Colourbox
s. 45	Timo Suvanto
s. 46	Timo Suvanto
s. 47	Timo Suvanto
s. 48	Dariusz Kuzminski / PantherMedia
s. 53 ylh.	Sanoma Pro Oy
s. 53 alh.vas.	Nina Tuittu
s. 53 alh.kesk.	Diego Cervo / PantherMedia
s. 53 alh.oik.	Dirk Butenschoen / PantherMedia
s. 54	Timo Suvanto
s. 55	Timo Suvanto
s. 57	Sergio Azenha / Alamy / AOP
s. 60	Colourbox
s. 67	Timo Suvanto
s. 70	Saaru Muranen / Sanoma Pro Oy
s. 73	Timo Suvanto
s. 75	Timo Suvanto
s. 76	Timo Suvanto
s. 77	Timo Suvanto
s. 78	Mike Watson / Corbis / SKOY
s. 80	Sanoma Pro Oy/Paula Kannisto
s. 84	Yuriy Chaban / PantherMedia
s. 86	PantherMedia
s. 87 ylh.	Nina Tuittu
s. 87 alh.	Sanoma Pro Oy
s. 93	Theodore Gray / Visuals Unlimited / Corbis / SKOY
s. 96	Alain Turgeon / PantherMedia
s. 99	Colourbox
s. 103 ylh.	Rob Freiberger / PantherMedia
s. 103 alh.	Filip Fuxa / PantherMedia
s. 107 ylh.	Elena Elisseeva / PantherMedia
s. 107 alh.	Ronija Rieger / Alamy / AOP
s. 112 ylh.	Timo Suvanto
s. 112 alh.	Colourbox
s. 114	Timo Suvanto
s. 116	David Morgan / Alamy / AOP
s. 118	Nataliia Peredniankina / PantherMedia
s. 119	Dmitri Maruta / Colourbox
s. 123	Timo Suvanto
s. 127	Riedinger Philippe / Colourbox
s. 129	Colourbox
s. 132	Colourbox
s. 135 ylh.	Ashley Cooper / Corbis / SKOY
s. 135 kesk.	Andreas Weber / PantherMedia
s. 135 alh.	Bernd Blume / PantherMedia
s. 136	Hannu Huovila / TVO